

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DOS PROCESSOS DE CONDENSAÇÃO E MIGRAÇÃO DE UMIDADE EM
MEIOS POROSOS CONSOLIDADOS. ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA
ARGAMASSA DE CAL E CIMENTO.

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CELSO PERES FERNANDES

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1990.

ESTUDO DOS PROCESSOS DE CONDENSAÇÃO E MIGRAÇÃO DE UMIDADE EM
MEIOS POROSOS CONSOLIDADOS. ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA
ARGAMASSA DE CAL E CIMENTO.

CELSO PERES FERNANDES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO




Prof. Paulo César Philippi, Dr. Ing.
Orientador



Prof. Arno Blass, Ph. D.
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Paulo César Philippi, Dr. Ing.
Presidente



Prof. Carlos Roberto Appoloni, D.Sc.



Prof. Alvaro Toubes Prata, Ph. D.



Prof. Roberto Lamberts, Ph. D.

PRECISA PERDER O MEDO DO SEXO
PRECISA PERDER O MEDO DA MORTE
PRECISA PERDER O MEDO DA MÚSICA
PRECISA PERDER O MEDO DA MÚSICA

O QUE SE VÊ NÃO SE VIA
O QUE SE CRÊ NÃO SE CRIA

PRECISA PERDER O MEDO DA MUSA
PRECISA PERDER O MEDO DA CIÊNCIA
PRECISA PERDER O MEDO DA PERDA
D A C O N S C I Ê N C I A

O QUE SE VÊ NÃO SE VIA
O QUE SE CRÊ NÃO SE CRIA

PRECISA PERDER O MEDO DE MIM
PRECISA PERDER O MEDO DE MIM
PRECISA PERDER O MEDO DA MÚSICA
PRECISA PERDER O MEDO DA MÚSICA

O QUE SE VÊ NÃO SE VIA
O QUE SE CRÊ NÃO SE CRIA

M E D O M E D O M E D O M E D O

O QUE SE CRÊ NÃO SE CRIA

PRECISA PERDER O MEDO DA MUSA
PRECISA PERDER O MEDO DA MUSA
PRECISA PERDER O MEDO DA MÚSICA
PRECISA PERDER O MEDO DA MÚSICA

M E D O M E D O M E D O M E D O

O QUE SE CRÊ NÃO SE CRIA

CANTÔNIO BELLOTO, MARCELO FROMER, ARNALDO ANTUNES

A Aglair, que tem me ensinado
muitas coisas, e que hoje é
Sra. Peres Fernandes no meu coração.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo César Philippi, pela sua maneira ousada de ver o mundo, e que muito de sua vivência tem me passado nestes anos.

A Aldomar Pedrini e Cláudio Ribeiro Brincas que com extrema dedicação e competência trabalharam nos experimentos desta pesquisa, meu sentimento de profundo respeito.

Ao professor Vicente de Paula Nicolau, coordenador do Laboratório de Termotécnica da UFSC no período de desenvolvimento deste trabalho, pela sua presteza em me fornecer condições infra-estruturais para a realização dos experimentos, aliada à sua amizade.

Ao professor José Antônio Bellini da Cunha Neto, que muito me esclareceu no início deste trabalho.

Ao professor Rodi Hickel, do Departamento de Engenharia Química da UFSC, pela atenção dispensada à minha pessoa.

Ao Marinho Bastos Quadri, pela oportunidade às discussões.

Ao Milton e ao Edevaldo pelas idéias e construção de vários dispositivos experimentais.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC, que muito me auxiliou na confecção das amostras de argamassa de cal e cimento.

Ao professor Glicério do Departamento de Engenharia Civil da UFSC pelo seu interesse neste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, pela realização do teste de porosimetria com injeção de mercúrio.

Ao pessoal do LATA: Saulo Güths, Paulo Schneider, Romeu, Luís Mauro e Alexandra, pelas conversas agradáveis.

Ao professor Roberto Lamberts que me passou uma porção de dicas e pela sua participação na banca examinadora.

Ao Daniel Paim que fotografou os experimentos desta pesquisa.

A Marisa Larsen Güths e Fábio Santana Magnani pela edição do texto deste trabalho.

Aos professores Carlos Roberto Appoloni e Álvaro Toubes Prata que me deram a satisfação de participarem na banca examinadora deste trabalho.

SUMARIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	x
SIMBOLOGIA	xiii
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xx
INTRODUÇÃO	xxi
1 - DESCRIÇÃO E MODO DE CONFECCÃO DAS AMOSTRAS DO MATERIAL	
OBJETO DE ESTUDO.....	2
1.1 - Apresentação do material.....	2
1.2 - Reação química de carbonatação.....	3
1.3 - Definição do padrão de massa seca.....	4
1.4 - Determinação da densidade aparente seca.....	4
1.5 - Determinação da porosidade.....	5
2 - ESTUDO DA CONDENSAÇÃO DE UMIDADE.....	8
2.1 - Fundamentos teóricos.....	8
2.1.1 - Equilíbrio entre a fase condensada e vapor.....	9
2.1.2 - Condensação puramente capilar.....	11
2.1.3 - Teorias de adsorção.....	14
2.1.3.1 - Teoria de Langmuir.....	14
2.1.3.2 - Teoria BET.....	16
2.1.3.3 - Teoria GAB.....	17
2.1.4 - Coexistência dos dois modos de condensação.....	18
2.1.5 - O fenômeno de histerese.....	21
2.1.6 - O modelo B.J.H.....	24
2.2 - Estudo experimental.....	28
2.2.1 - Preparação das amostras.....	28
2.2.2 - Condição higrotérmica nos dessecadores..	29
2.2.3 - Modo de obtenção da umidade de equilíbrio.....	29
2.2.4 - Resultados obtidos.....	32
2.2.5 - Qualidade do ajustamento matemático.....	38
2.2.6 - Análise de erros.....	38

3 - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA POROSA DA ARGAMASSA E DO SEU COMPORTAMENTO FRENTE À ÁGUA EM CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO HIGROTÉRMICO.....	42
3.1 - Porosimetria com injeção de mercúrio.....	42
3.1.1 - Princípio do método.....	42
3.1.2 - Modo operacional.....	45
3.2 - Modelo B.J.H. para investigação do espectro poroso com raios menores que 240 Å.....	48
3.3 - Obtenção da isoterma de adsorção a partir da estrutura porosa. Separação dos conteúdos adsorvido e capilar.....	52
3.4 - Análise dos resultados.....	55
4 - MEDIÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE EM MATERIAIS POROSOS CONSOLIDADOS.....	58
4.1 - Método gravimétrico.....	58
4.2 - Medição do conteúdo de umidade por métodos elétricos.....	59
4.3 - Medição do conteúdo pelo método de atenuação de raios-gama.....	59
4.4 - Medição do conteúdo de umidade através de propriedades térmicas dos meios porosos.....	60
4.4.1 - Princípios do método da sonda térmica....	61
4.4.2 - Detalhes construtivos da sonda térmica...	61
4.4.3 - Cálculo teórico da evolução de temperatura com o tempo na sonda térmica.	63
4.4.4 - Determinação experimental da condutividade térmica.....	65
4.4.5 - Avaliação teórica da incerteza de medição da condutividade térmica.....	69
4.4.6 - Determinação experimental da curva padrão de condutividade térmica em função do conteúdo de umidade.....	74
4.4.7 - Comentários a respeito do método da sonda térmica.....	77

5 - ESTUDO DA MIGRAÇÃO DE UMIDADE.....	80
5.1 - Estudo teórico.....	81
5.1.1 - O conceito de volume elementar representativo.....	81
5.1.2 - Equações de transferência macroscópica. O modelo de Philip e De Vries.....	82
5.1.2.1 - Expressão para o fluxo de líquido.....	83
5.1.2.2 - Expressão para o fluxo de vapor	84
5.1.2.3 - Interação entre vapor e ilhas de líquido.....	86
5.1.2.4 - A introdução de dois fatores corretivos na expressão da difusividade de vapor devido gradiente de temperatura.....	88
5.1.2.5 - Expressão para a densidade do fluxo de massa.....	89
5.1.2.6 - Migração de umidade no caso isotérmico.....	89
5.1.2.7 - Evolução dos coeficientes de transferência isotérmica.....	90
5.2 - Estudo experimental da migração de umidade.....	91
5.2.1 - Descrição do aparato experimental.....	92
5.2.2 - Modelo matemático para o problema de infiltração horizontal.....	97
5.2.3 - Resultados experimentais. Avaliação dos coeficientes de transferência.....	98
5.2.4 - Análise dos resultados.....	101
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
APÊNDICES.....	113
A - Umidade relativa mantida pelas soluções salinas saturadas a 25°C.....	114
B - Método da diferenciação geométrica.....	116
C - Evolução de temperatura com o tempo na sonda térmica...	120
D - Transformação de Boltzmann.....	132

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 - Distribuição granulométrica da areia.....	3
Figura 2.1 - Os dois modos de condensação da água no seio poroso.....	9
Figura 2.2 - Lei de Laplace.....	11
Figura 2.3 - Condensação puramente capilar em um poro cilíndrico de raio r	12
Figura 2.4 - Esquema para a teoria de Langmuir.....	14
Figura 2.5 - Esquema para o modelo BET.....	17
Figura 2.6 - Comparação dos três modelos de adsorção.....	18
Figura 2.7 - Sucessão dos modos de condensação em um poro cilíndrico isolado.....	19
Figura 2.8 - Isoterma de adsorção-dessorção de um meio poroso.....	20
Figura 2.9 - Diferentes ângulos de contacto nos processos de adsorção-dessorção para um poro cilíndrico de raio r	22
Figura 2.10 - Formação de poro "com garganta".....	23
Figura 2.11 - Histerese a nível de um poro.....	24
Figura 2.12 - Poro preenchido com água capilar.....	25
Figura 2.13 - Aumento da espessura da camada adsorvida nos poros com raio superior a $r + \Delta r$	26
Figura 2.14 - Fotografias do aparato experimental utilizado na determinação das isotermas de adsorção-dessorção.....	31
Figura 2.15 - Pontos experimentais adsorção-dessorção.....	32
Figura 2.16 - Comparação entre os pontos experimentais de adsorção e o ajuste através do modelo GAB...	34
Figura 2.17 - Comparação entre os pontos experimentais de adsorção e o ajuste através do modelo BET...	35
Figura 2.18 - Comparação entre os pontos experimentais de dessorção e o ajuste através do modelo GAB..	36
Figura 2.19 - Comparação entre os pontos experimentais de dessorção e o ajuste através do modelo BET..	37

Figura 2.20	- Erro absoluto na medição de massa para a determinação do conteúdo de umidade.....	40
Figura 3.1	- Poro cilíndrico contendo mercúrio.....	43
Figura 3.2	- Formação de poros "com garganta".....	44
Figura 3.3	- Repartição de volumes de poros para os dois ensaios de porosimetria.....	46
Figura 3.4	- Repartição de superfícies de poros para o ensaio 2.....	47
Figura 3.5	- Função distribuição de volumes de poros.....	50
Figura 3.6	- Função densidade de probabilidade para os volumes de poros.....	51
Figura 3.7	- Repartição de superfícies de poros.....	51
Figura 3.8	- Separação dos conteúdos adsorvido e capilar.	53
Figura 3.9	- Comparação entre a isoterma experimental de adsorção e a obtida através do modelo B.J.H. a partir da estrutura porosa do material....	54
Figura 4.1	- A sonda térmica.....	61
Figura 4.2	- Fotografias da sonda térmica.....	62
Figura 4.3	- Modo de inserção da sonda nas amostras.....	63
Figura 4.4	- Arranjo experimental para medição da condutividade térmica.....	65
Figura 4.5	- Curva típica de evolução de temperatura na sonda.....	66
Figura 4.6	- Fotografias do aparato experimental utilizado na medição da condutividade térmica.....	68
Figura 4.7	- Condutividade térmica aparente em função do conteúdo de umidade (argamassa de cal e cimento a 25°C).....	76
Figura 5.1	- A noção de volume elementar representativo..	82
Figura 5.2	- Transferência de umidade através de uma ilha de líquido.....	87
Figura 5.3	- Evolução dos coeficientes de transferência isotérmica com o conteúdo de umidade.....	91
Figura 5.4	- Aparato experimental para estudo da migração de umidade.....	93

Figura 5.5	- Fotografias do aparato experimental para estudo da migração de umidade.....	95
Figura 5.6	- Distribuição do conteúdo de umidade nas colunas para os testes 1 e 2.....	99
Figura 5.7	- Dependência da difusividade isotérmica de umidade D_e (obtida experimentalmente) e da estimativa do coeficiente D_{ev} com o conteúdo de umidade (25°C).....	101
Figura A.1	- Variação da umidade relativa mantida pelas soluções salinas com a temperatura.....	115
Figura B.1	- Ilustração para o método da diferenciação geométrica.....	116

SIMBOLOGIA

<u>SÍMBOLO</u>	<u>SIGNIFICADO E UNIDADES</u>
a_1	Difusividade térmica do meio 1, o mercúrio $[m^2.s^{-1}]$
a_2	Difusividade térmica do meio 2, a argamassa $[m^2.s^{-1}]$
$A_1, A_2,$ A_3, A_4	Constantes na Eq. 4.2
A_{pm}	Superfície projetada de uma molécula de água adsorvida $[Å^2]$
C	Constante BET
C'	Constante GAB
C_o	Calor específico da sonda $[J.Kg^{-1}.K^{-1}]$
DM	Dispersão da medição
DP	Desvio padrão
D_{atm}	Coeficiente de difusão molecular livre do vapor de água no ar $[m^2.s^{-1}]$
D_{el}	Difusividade isotérmica de líquido $[m^2.s^{-1}]$
D_{ev}	Difusividade de vapor devida a gradientes de conteúdo de umidade $[m^2.s^{-1}]$
D_{tl}	Difusividade de líquido devida a gradientes de temperatura $[m^2.s^{-1}]$
D_{tv}	Difusividade de vapor devida a gradientes de temperatura $[m^2.s^{-1}]$
D_e	Difusividade isotérmica de umidade $[m^2.s^{-1}]$
D_T	Difusividade de umidade devida a gradientes de temperatura $[m^2.s^{-1}]$

E_1	Calor de adsorção da primeira camada de moléculas [j.mol ⁻¹]
E_l	Calor latente de vaporização do adsorbato [j.mol ⁻¹]
E_m	Calor de adsorção das multicamadas (parâmetro GAB) [j.mol ⁻¹]
e_a	Espessura da camada adsorvida [Å]
e_m	Espessura de uma camada monomolecular adsorvida [Å]
F	Função distribuição de volume de poros
$f(T)$	Função da temperatura T
f_s	Fator de Student
g_l	Entalpia livre específica do líquido [j.Kg ⁻¹]
g_v	Entalpia livre específica do vapor [j.Kg ⁻¹]
\dot{g}	Entalpia no estado de referência [j.Kg ⁻¹]
g	Aceleração da gravidade, Eq.5.7 [m.s ⁻²]
H	Coefficiente de troca de calor superficial entre os meios 1 e 2 [W.m ⁻² .K ⁻¹]
h	Umidade relativa
h_c	Limite de condensação (ou evaporação) capilar
i	Intensidade de corrente elétrica [A]
K	Parâmetro GAB
K_c	Condutividade hidráulica insaturada [m.s ⁻¹]
l	Comprimento da sonda [m]
M	Massa molecular [Kg/mol]
m	Massa [Kg]
M_o	Massa da sonda por unidade de comprimento [Kg/m]
n	Porosidade [m ³ .m ⁻³]
N	Número de pontos experimentais
$N(h)$	Número de camadas adsorvidas
p	Pressão [N.m ⁻²]

Q	Potência emitida por unidade de comprimento da sonda $[W.m^{-1}]$
\vec{q}	Vetor densidade de fluxo $[Kg.m^{-2}.s^{-1}]$
r	Raio de poro $[Å = 10^{-10}m]$
R_c	Raio de uma interface esférica [m]
R	Constante dos gases perfeitos $[J.mol^{-1}.K^{-1}]$
R_m	Resistência elétrica por unidade de comprimento $[\Omega.m^{-1}]$
rc_1, rc_2	Raios de curvatura principais de uma interface [m]
r_1	Raio da sonda [m]
r_2	Raio do furo na argamassa [m]
r_k	Raio do núcleo no centro do poro, considerando a camada adsorvida
S	Superfície específica $[m^2.m^{-3}]$
ΔS_r	Superfície lateral de uma classe de poros $[m^2.m^{-3}]$
$S(r)$	Superfície específica acumulada dos poros com raio maior que r $[m^2.m^{-3}]$
S_{total}	Superfície específica total de um meio poroso $[m^2.m^{-3}]$
T	Temperatura [K]
t	tempo [s]
$T_s(t)$	Temperatura da sonda em função do tempo [K]
u_1, u_2, u_3	Constantes na Eq.2.26
V	Volume $[m^3]$
$V(r)$	Volume dos poros com raio inferior a r $[m^3.m^{-3}]$
$Vp(r)$	Volume acumulado dos poros com raio maior que r $[m^3.m^{-3}]$

V_{poros}	Volumes dos poros acessíveis às moléculas de água $[m^3]$
V_{total}	Volume total de uma amostra $[m^3]$
W	Conteúdo de unidade mássico $[Kg/Kg]$
W_m	Conteúdo de unidade mássico correspondente à formação de uma camada monomolecular sobre a parede do poro $[Kg/Kg]$
W_c	Conteúdo de unidade mássico, calculado com o uso da curva padrão $W = W(\lambda)$
x	Coordenada de posição $[m]$

SÍMBOLOS GREGOS

SIGNIFICADOS E UNIDADES

α	Ângulo de contacto $[^\circ]$
τ	Tortuosidade
ν	Coeficiente de Stefan
$f(\theta), \zeta$	Fatores corretivos para a expressão de D_{TV}
η	Variável relativa à transformação de Boltzmann
e	Conteúdo de unidade volumétrico $[m^3.m^{-3}]$
e_k	Conteúdo de unidade crítico que define o limite de continuidade da fase líquida
e_f	Conteúdo de unidade na face de infiltração das colunas de argamassa
e_i	Conteúdo de unidade inicial nas colunas de argamassa
λ_1	Condutividade térmica do meio 1, o mercúrio $[W.m^{-1}.K^{-1}]$
λ_2	Condutividade térmica do meio 2, a argamassa $[W.m^{-1}.K^{-1}]$
λ	Condutividade térmica da argamassa $[W.m^{-1}.K^{-1}]$
γ	(= 0,5572) a constante de Euler
ρ_o	Densidade aparente do material seco $[Kg.m^{-3}]$

ρ_l	Massa específica da água $[\text{Kg.m}^{-3}]$
θ	Potencial matricial generalizado $[\text{N.m}^{-2}]$
ψ	Potencial matricial capilar [m.c.a.]
ψ_f	Potencial matricial capilar na face de infiltração das colunas de argamassa [m.c.a.]
σ	Tensão superficial $[\text{N.m}^{-1}]$

SUB-ÍNDICES

SIGNIFICADO

sat	Referente ao estado saturado
seca	Referente ao estado seco
a	Ar
l	Líquido
v	Vapor
vs	Vapor saturado
s	Sólido
o	Referente à fase gasosa
ads	Relativo à adsorção ou à camada adsorvida
des	Relativo à dessorção
p	Referente a poro
g	Referente a garganta
cap	Relativo a capilar
max	Relativo a uma quantidade máxima
ue	Relativo à massa úmida na condição de equilíbrio
min	Relativo a uma quantidade mínima

RESUMO

O presente trabalho trata de uma análise experimental dos fenômenos físicos de condensação e migração de umidade em um meio poroso consolidado, um tipo de argamassa de cal e cimento, de uso bastante comum no revestimento de paredes externas de edificações.

Este estudo é motivado pelo fato de o comportamento térmico das edificações sofrer significativas alterações, em decorrência da interação entre os processos de transferência de umidade e transferência de calor.

Em uma primeira etapa, para a consecução da análise suscitada, procede-se um estudo experimental para a obtenção das isotermas de adsorção e dessorção da argamassa de cal e cimento, com o auxílio de soluções salinas padrões. Em seguida, é feita uma investigação da estrutura porosa da argamassa, através do método de porosimetria com injeção de mercúrio para os poros com raio até 240 Å; os poros menores são analisados com o uso da isoterma experimental de adsorção, conjugada ao modelo B.J.H., que leva em consideração os dois modos de condensação da água em um meio poroso: água adsorvida nas paredes dos poros, e água condensada na forma capilar.

Em uma segunda parte, deseja-se estudar a migração de umidade (apenas o caso de embebição) em colunas da argamassa de cal e cimento. Para tanto, é necessário o domínio de um método de medição de conteúdo de umidade, que possa ser aplicado em materiais porosos consolidados. Dentre os existentes, decidiu-se utilizar um método indireto, baseado na influência do conteúdo de umidade sobre a condutividade térmica aparente dos materiais porosos. A relação de dependência entre a condutividade térmica e o conteúdo de umidade é estabelecida experimentalmente através do método da sonda térmica. O método é apresentado, e algumas questões referentes a sua utilização são discutidas.

Procede-se, então, a análise experimental do fenômeno de migração de umidade, em sistemas isotérmicos, utilizando o método da sonda térmica para acompanhar a evolução dos perfis de

umidade em colunas da argamassa de cal e cimento.

No decorrer do trabalho, apresenta-se algumas conclusões a respeito do comportamento hídrico da argamassa, tendo como suporte de análise a sua estrutura porosa.

ABSTRACT

In this work an experimental analysis of the physical phenomena of condensation and moisture migration in a consolidated porous media is described. The media used is a lime mortar normally used for external building walls.

The motivation for this study comes from the fact that the thermal behavior of buildings is very dependent on the combined heat and moisture transfer processes.

First, an experimental study to obtain adsorption and desorption isothermes is developed using saline solutions. An investigation of the porous structure is performed using the mercury intrusion technic for pores up to 240 Å; smaller pore are analysed using the experimental sorption isothermes together with the B.J.H. model. This model takes into account two modes of vapor condensation in a porous media: physical adsorption on the pore walls and capillary condensation.

In a second part, moisture migration in columns of lime mortar is studied.

It was then necessary to use a method for measuring the moisture content applicable to consolidated porous media.

Among the available methods, an indirect method was chosen. In this method the relation moisture content \times apparent thermal conductivity is established experimentally using a thermal probe. The method is presented together with a discussion on its use.

An experimental analysis of the moisture migration in isothermal systems using the thermal probe is performed to study the evolution of the moisture distribution in the lime mortar columns.

Throughout the work some conclusions about the hidric behavior of the lime mortar are drawn based on the porous structure analysis previously made.

INTRODUÇÃO

Os materiais porosos que constituem as paredes das edificações, estão constantemente submetidos a diversos fenômenos físicos, que conduzem à presença e migração de umidade (água líquida e vapor) através de sua estrutura.

A migração de umidade ocorre devido a gradientes de conteúdo de umidade e gradientes de temperatura, e modifica sensivelmente os coeficientes de transporte de calor. Esse estudo se apresenta então, bastante difícil, em decorrência da interação entre os processos de transporte de umidade e transporte de calor. Junte-se a isso, a existência de duas fases no meio poroso - água líquida e vapor - que se interagem mutuamente e com a matriz sólida; deve-se considerar ainda, a estrutura porosa complexa que apresentam os materiais consolidados, notadamente aqueles à base de ligantes hidráulicos.

Por outro lado, boa parte da energia consumida nas edificações é devida aos sistemas de climatização. Torna-se interessante, dessa maneira, o estudo da influência da umidade sobre a transferência de calor, visando um aprimoramento nos projetos de climatização, o que implicará em um uso racional de energia. Também, o conhecimento do comportamento hídrico dos materiais que compõem as paredes, é importante para o estabelecimento de estratégias que minorem os problemas de degradação desses materiais, além de melhorar as condições de conforto e higiene aos usuários da habitação.

Como se pode observar, o estudo citado acima é bastante extenso, e neste trabalho nos limitamos a uma pesquisa experimental, em condições isotérmicas, com o objetivo de obter informações a respeito do comportamento hídrico de uma argamassa de cal e cimento.

Diversos pesquisadores têm-se voltado para o estudo da transferência de calor e umidade em meios porosos consolidados, dentre os quais citamos:

- Van Der Kooi (1971) [1], estudou a migração de umidade (devido gradientes de conteúdo de umidade e temperatura) em um material de construção civil denominado concreto celular;

- Perrin (1985) [2], realizou um estudo da transferência de calor e umidade sobre dois materiais consolidados, utilizados na construção civil: um tijolo terracota e uma argamassa de cimento.

A argamassa de cimento apresenta a seguinte composição, em massa:

1 parte de ligante (cimento portland);

3 partes de areia;

1/2 parte de água.

A argamassa de cimento é um material que apresenta grandes proporções do volume poroso, formado por mesoporos ($20 \text{ \AA} < \text{raio} < 500 \text{ \AA}$) e macroporos ($\text{raio} > 500 \text{ \AA}$) à semelhança da argamassa de cal e cimento que será analisada neste trabalho;

- Daian (1986) [3], fez um estudo experimental dos fenômenos de condensação e migração de umidade sobre uma argamassa de cimento. Ele procurou explicar o comportamento dos coeficientes de transferência, através do conhecimento da estrutura porosa e dos modos de condensação da água no seio poroso. Daian operou a passagem das leis físicas que governam os processos de transferência na escala microscópica, a nível de poro, para a escala macroscópica;

- Merouani (1987) [4], fez um estudo comparativo do comportamento hídrico de uma argamassa de cimento e de uma argamassa impermeabilizante, utilizada no revestimento de fachadas.

As diferenças de comportamento hídrico entre os dois materiais são explicados com base em suas estruturas porosas.

A argamassa de revestimento apresenta a seguinte composição, em massa: 20% de ligantes (cimento branco CPA 55 e cal aérea) e 80% de areias (siliciosa e calcárea), onde são incorporados os seguintes aditivos: retentor de água, hidrófugo de massa, incorporador de ar, resina sintética e pigmentos.

A estrutura porosa resultante é formada essencialmente por macroporos, quase não existindo mesoporos.

Comenta-se em seguida a estrutura de apresentação do presente trabalho :

O capítulo 1 é destinado à apresentação do material poroso que será o objeto de estudo: uma argamassa de cal e

cimento. Faz-se uma descrição do modo de confecção das amostras e comenta-se sobre a reação química de carbonatação que ocorre no material exposto ao ar livre. Ainda neste capítulo, são determinadas experimentalmente, duas características físicas da argamassa: a densidade aparente e a porosidade;

No capítulo 2 é apresentado um estudo teórico dos fenômenos de condensação e evaporação de umidade em meios porosos no estado de equilíbrio higrotérmico, distinguindo-se os fenômenos de adsorção e capilaridade.

São apresentados, de maneira bastante condensada, três modelos de adsorção pura: Langmuir, BET e GAB. Apresenta-se também o modelo B.J.H., que leva em conta a presença simultânea das fases adsorvida e capilar.

Finalmente, procede-se um estudo experimental para a obtenção das isotermas de adsorção e dessorção da argamassa de cal e cimento.

O capítulo 3 é dedicado à determinação da estrutura porosa da argamassa. Isto é feito com o uso de porosimetria com injeção de mercúrio para poros com raio até 240 Å; os poros menores são investigados com o uso da isoterma experimental de adsorção e o modelo B.J.H.

No final deste capítulo, é feita uma análise do comportamento hídrico da argamassa, em condições de equilíbrio higrotérmico, tendo-se como base a sua estrutura porosa.

No capítulo 4 apresenta-se o método de medição de conteúdo de umidade que será utilizado nos experimentos de infiltração de água em colunas de argamassa. Consiste de um método indireto, baseado na relação de dependência que existe entre a condutividade térmica aparente e o conteúdo de umidade, estabelecida previamente através de experimentação.

A condutividade térmica aparente é medida com o auxílio do método transiente da sonda térmica, que é fundamentado na teoria da "linha infinita geradora de calor", devida a Carslaw e Jaeger (1959) [5]. Vários pesquisadores têm utilizado este método para a medição da condutividade térmica: Van Der Kooi [1], Kasubuchi [6], Woodside e Messmer [7], Faraht e Yamame [8], entre outros.

Perrin [2], utilizou a sonda térmica como método indireto de medição de conteúdo de umidade em materiais porosos.

O método da sonda térmica é apresentado, e algumas questões relativas a sua utilização são comentadas. Procede-se ainda, uma análise de erros, bastante simplificada, da medição da condutividade térmica com a sonda térmica.

No capítulo 5 é feita em uma primeira parte, a revisão da teoria de Philip e De Vries, que explica os fenômenos de transferência de umidade em meios porosos com uma visão macroscópica.

Numa segunda parte do trabalho, procede-se um estudo experimental da migração de umidade, em condições isotérmicas, utilizando o método da sonda térmica para a obtenção dos perfis de conteúdo de umidade em colunas de argamassa. Neste trabalho não será estudado o processo de secagem, mas apenas o de infiltração - utilizando o método sugerido por Bruce e Klute [16]- e será obtida a dependência da difusividade isotérmica de umidade (um parâmetro que engloba migração de líquido e vapor) com o conteúdo de umidade.

Algumas considerações a respeito do problema da reação química de carbonatação que ocorre nas amostras, bem como os comentários finais e sugestões para trabalhos futuros que visem ampliar esta análise, são tratados no capítulo 6.

CAPÍTULO 1

1 - DESCRIÇÃO E MODO DE CONFECCÃO DAS AMOSTRAS DO MATERIAL OBJETO DE ESTUDO

Neste capítulo é apresentado o material, uma argamassa de cal e cimento, que será objeto de estudo. Discorre-se sobre a maneira de confecção das amostras que serão utilizadas nos ensaios e ênfase é dada à reação química de carbonatação que ocorre durante os processos de cura e secagem.

Mostra-se também, o procedimento de secagem das amostras, bem como a definição de um padrão para a massa seca.

Finalmente, duas características físicas da argamassa, a densidade aparente e a porosidade, são determinadas.

1.1 - APRESENTAÇÃO DO MATERIAL

Foram utilizadas amostras de uma argamassa de cal e cimento (reboco) confeccionadas na proporção em massa 8:2:1 (areia fina : cal : cimento) com adição de água representando cerca de 20% da massa total. As amostras foram confeccionadas no "Laboratório de Materiais de Construção Civil" pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

A Fig.1.1 mostra a distribuição granulométrica da areia obtida por Quadri [17], com o uso de peneiras. A areia foi coletada nas proximidades da Praia da Pinheira, Estado de Santa Catarina; uma amostra foi lavada e constatou-se - pelo método gravimétrico - a ausência de materiais solúveis, p.ex., sais.

A cal hidratada e o cimento pozolânico utilizados são de marca comercial Minercal e Pozosul, respectivamente.

Os componentes da argamassa são misturados mecanicamente e a água adicionada dá uma plasticidade adequada à trabalhabilidade nos moldes.

A argamassa é então curada pelo período de 28 dias, sendo que a desmoldagem é feita no 5º dia. Dois formatos geométricos de amostras foram confeccionados: cilindros (altura de 100 mm e diâmetros de 100 mm e 70 mm) e paralelepípedos (70 x 70 x 200 mm³).

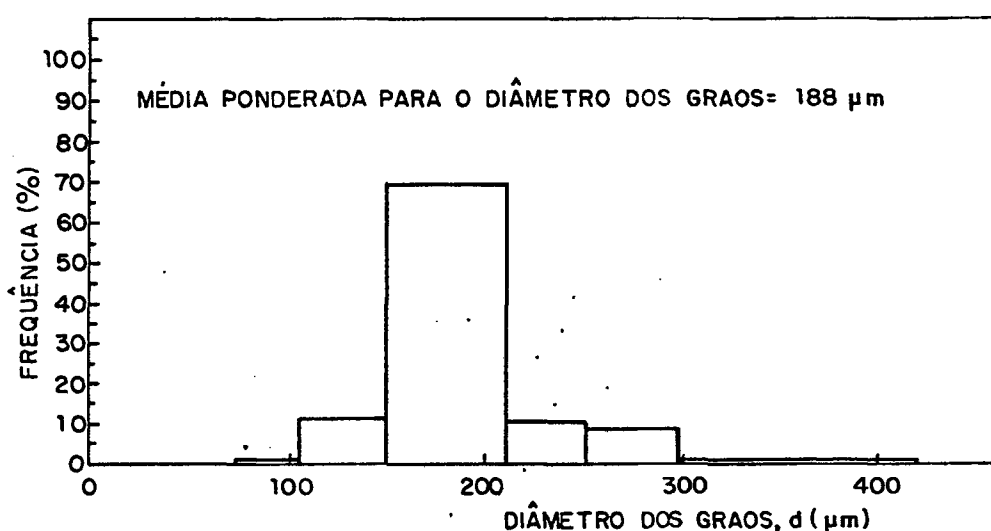
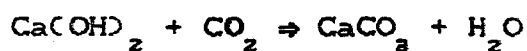


Fig.1.1 - Distribuição granulométrica da areia.

1.2 - REAÇÃO QUÍMICA DE CARBONATAÇÃO

Quando as amostras são mantidas ao ar livre, elas ficam sujeitas à reação de carbonatação. Ela decorre da ação do CO_2 presente no ar sobre a cal:



Esta é uma reação que progride lentamente a partir da superfície em direção ao centro do material devido à difusão de gás carbônico. Há modificação da composição química da pasta de ligantes (cal e cimento) e o carbonato de cálcio resultante é mais solúvel que a cal: na presença de água renovável há perda de matéria sólida e aumento da porosidade, [3].

A velocidade de progressão da carbonatação é função da temperatura e umidade relativa do ar. Ela aumenta sensivelmente com a temperatura e atinge um máximo para a umidade relativa de 50%, [3]. A reação praticamente não ocorre em atmosferas saturadas de umidade ou totalmente secas.

Observou-se para as amostras de argamassa de cal e

cimento a espessura da camada carbonatada com o uso do indicador ácido-base fenolftaleína.

Após o período de cura e secagem das amostras (cujo método será descrito na seção seguinte) a espessura da camada carbonatada ficou em torno de 4 mm.

1.3 - DEFINIÇÃO DO PADRÃO DE MASSA SECA

A massa seca das amostras é um parâmetro importante a se definir pois ela influi diretamente na determinação da densidade aparente seca, da porosidade e do conteúdo de umidade.

Por outro lado, a massa seca das amostras, é função das condições higrotérmicas no interior da estufa, e do tempo de secagem.

O problema relacionado à secagem das amostras de reboco diz respeito à desidratação da pasta de ligantes (cal e cimento) quando a temperatura é suficientemente elevada. De fato, a hidratação da pasta de ligantes não é totalmente irreversível podendo haver evaporação da água quimicamente adsorvida.

Com base em Merouani [4], secou-se as amostras em estufa a 75°C e na presença de sílica-gel, um agente dessecante, por período de tempo suficiente à estabilização das massas.

Esta temperatura será, possivelmente, insuficiente para evaporar toda a água fisicamente adsorvida (nas paredes dos poros) mas impede a evaporação da água da pasta de ligantes.

1.4 - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE SECA

A densidade aparente seca foi obtida pela medição direta da massa seca, como definida na seção anterior, e do volume de cinco paralelepípedos pequenos, tirados dos núcleos das amostras cilíndricas por serragem. Como os paralelepípedos foram retirados do núcleo, a carbonatação neles existente será devida apenas ao período de secagem e notou-se que ela ficava apenas a nível de superfície. As amostras foram serradas e lixadas com especial cuidado para que se tivesse perpendicularismo entre as faces adjacentes.

Utilizou-se nas medições uma balança digital com resolução 10^{-2} g e um paquímetro com resolução 10^{-1} mm.

A densidade assim obtida apresenta o valor $1,73 \pm 0,05$ g/cm³.

1.5 - DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE

A porosidade é definida como a razão entre o volume dos poros (acessíveis às moléculas de água) e o volume total de determinada amostra:

$$n = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} \quad (1.1)$$

Sua determinação é feita saturando-se com água destilada amostras do material.

O conteúdo mássico na saturação é:

$$W_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}}} \quad (1.2)$$

onde:

m_{sat} = massa da amostra saturada com água;

m_{seca} = massa da amostra seca.

Dessa maneira, a relação entre a porosidade e o conteúdo na saturação é dada por:

$$n = W_{\text{sat}} \cdot \left[\frac{\rho_s}{\rho_l} \right] \quad (1.3)$$

onde:

ρ_s = densidade aparente do material seco;

ρ_l = densidade da água (1g/cm³).

O problema concernente a esse método refere-se à obtenção de amostras efetivamente saturadas. De fato, a saturação por imersão em água destilada à pressão atmosférica

não é conseguida, devido ao aprisionamento do ar em certos poros.

Para resolver em parte essa questão, as mesmas amostras utilizadas no ensaio de densidade aparente foram colocadas em um recipiente hermético (dessecador) e submetidas a um vácuo parcial (em torno de 200 mm Hg), ficando nessa condição por duas horas.

Após esse processo de evacuação, colocou-se água destilada no dessecador (através de uma válvula de controle) e deixou-se o tempo necessário à saturação das amostras.

A porosidade assim obtida é de $0,31 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

CAPITULO 2

2 - ESTUDO DA CONDENSAÇÃO DE UMIDADE

Neste capítulo, propõe-se estudar os fenômenos de condensação-evaporação em meios porosos, quando em estado de equilíbrio higratérmico na presença de vapor de água.

Pretende-se distinguir os fenômenos de adsorção de superfície e capilaridade, analisando-se a natureza desses dois tipos de água condensada que coexistem em meios porosos.

São apresentados modelos teóricos que tentam explicar o fenômeno de adsorção pura, e um modelo que leva em conta a presença simultânea das fases adsorvida e capilar.

As isotermas de adsorção-dessorção são obtidas experimentalmente com o uso de soluções salinas padrões que mantêm umidades relativas constantes a uma dada temperatura.

No capítulo seguinte essas isotermas serão analisadas tendo-se como base a estrutura porosa da argamassa.

2.1 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

No estudo da condensação-evaporação de água em meios porosos, em estado de equilíbrio higratérmico, são assumidas as seguintes hipóteses:

- a estrutura porosa é indeformável;
- a matriz sólida é quimicamente inerte com relação à água;
- a água quimicamente adsorvida (presente na pasta de ligantes) não participa dos processos de adsorção física;
- o vapor de água é assumido como gás perfeito;
- o ar é um composto inerte que não condensa sobre a matriz porosa nem interage com ela. O interesse na fase gasosa é sobretudo do ponto de vista da concentração de vapor de água.

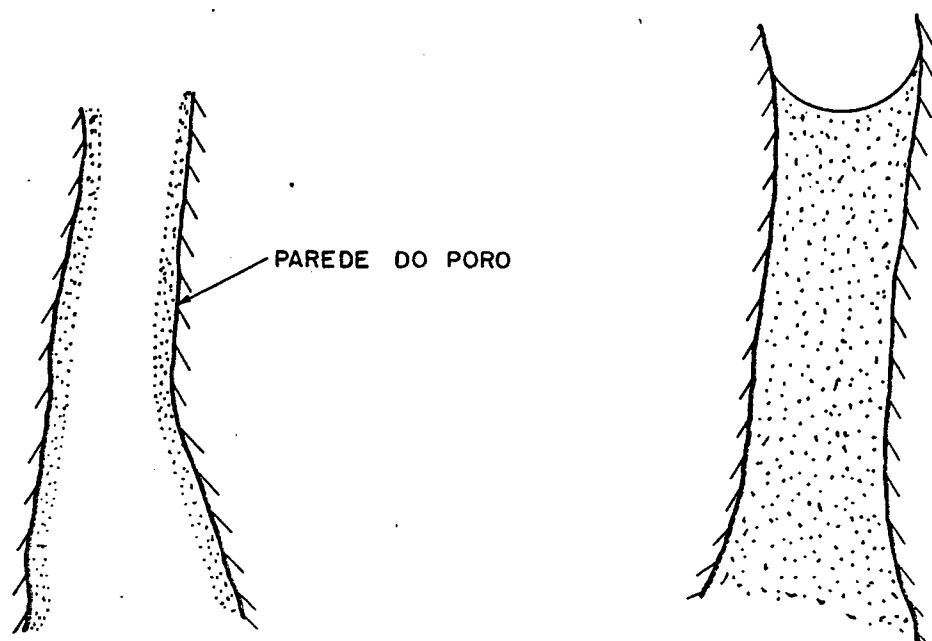
As isotermas de adsorção-dessorção descrevem as condições de equilíbrio entre ar úmido, água líquida e a matriz porosa. O conteúdo de umidade obtido experimentalmente para uma dada condição de equilíbrio higratérmico é composto de uma parcela de água adsorvida e outra de água capilar.

A água adsorvida é composta de camadas de moléculas que condensam sobre a superfície dos poros Fig.2.1.a.

Sua quantidade no equilíbrio é função da superfície específica do meio poroso, da afinidade entre o vapor de água e a matriz sólida e das condições higrotérmicas reinantes.

A água capilar Fig.2.1.b representa uma fase contínua de líquido que preenche totalmente certos poros do material.

Existe uma descontinuidade de pressão na interface curva que separa a água capilar da fase gasosa.



(a) água adsorvida

(b) água capilar

Fig.2.1 - Os dois modos de condensação da água no seio poroso.

2.1.1 - EQUILÍBRIO ENTRE A FASE CONDENSADA E SEU VAPOR

No seio de um meio poroso, quando do equilíbrio termodinâmico entre a fase condensada e seu vapor, há igualdade das entalpias livres específicas (ou potenciais termodinâmicos):

$$g_l = g_v \quad (2.1)$$

Com a hipótese da fase gasosa ser uma mistura de gases perfeitos, sua entalpia livre será dada, segundo [9], por:

$$g_v = \frac{R}{M} T \left[f(T) + \ln p_v \right] \quad (2.2)$$

onde:

R = constante dos gases perfeitos [J/mol/K];

M = massa molar da água [Kg/mol];

p_v = pressão parcial do vapor [N/m²];

$f(T)$ é uma função da temperatura T .

Tomando-se o caso de equilíbrio à temperatura T entre o líquido condensado em contacto com seu vapor saturado, define-se:

$$\dot{g}_v = \frac{R}{M} T \left[f(T) + \ln p_{vs} \right] \quad (2.3)$$

onde:

p_{vs} = pressão do vapor saturado.

A expressão anterior é comumente tomada como a entalpia livre de referência à temperatura T , para a definição do estado do vapor. No caso da fase condensada a referência correspondente será a entalpia livre do líquido, \dot{g}_l :

$$\dot{g}_v = \dot{g}_l \quad (2.4)$$

Do conceito de potencial termodinâmico, define-se o potencial matricial:

$$\phi_l = \rho_l \left(g_l - \dot{g}_l \right) ,$$

$$\phi_v = \rho_l \left(g_v - \dot{g}_v \right) \quad (2.5)$$

onde:

ρ_l = massa específica da água [Kg/m³]

O potencial matricial, como definido na Eq.2.5, apresenta unidades de pressão.

Pode-se, então, escrever a lei de equilíbrio como:

$$\theta_l = \theta_v = \frac{\rho_l R T}{M} \ln h \quad (2.6)$$

onde:

h = a pressão relativa de vapor, chamada de unidade relativa para o caso da água.

O potencial matricial define o estado energético da água, seja ela capilar ou adsorvida.

A Eq.2.6 é a lei de Kelvin generalizada, e é fundamentada na igualdade dos potenciais termodinâmicos e na hipótese de o vapor ser gás perfeito.

2.1.2 - CONDENSAÇÃO PURAMENTE CAPILAR

A descontinuidade de pressão na interface curva (menisco capilar) é dada pela lei de Laplace (ver Fig.2.2):

$$p_o - p_l = \sigma \left[\frac{1}{rc_1} + \frac{1}{rc_2} \right] \quad (2.7)$$

σ = tensão superficial, característica dos dois fluidos presentes;

rc_1 , rc_2 = raios de curvatura principais da interface.

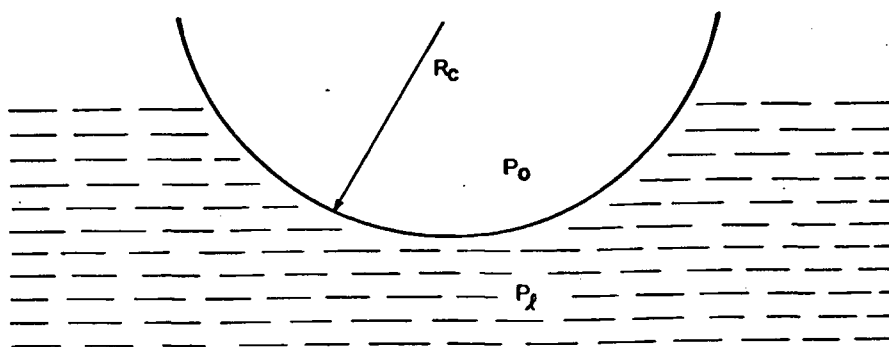


Fig.2.2 - Lei de Laplace.

Para uma interface esférica de raio R_c , os raios de curvatura principais são iguais a R_c e a Eq.2.7 será escrita:

$$P_o - P_l = \frac{2\sigma}{R_c} \quad (2.8)$$

Consideremos agora um poro cilíndrico de raio r , com uma interface capilar esférica de raio R_c , (Fig.2.3), no qual fazemos abstração da água adsorvida (condensação puramente capilar).

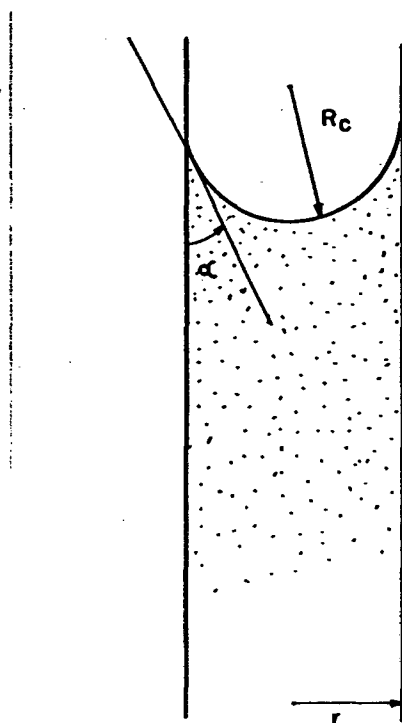


Fig.2.3 - Condensação puramente capilar em um poro cilíndrico de raio r .

Nesse caso, o potencial matricial se confunde com a pressão capilar (diferença de pressão no menisco) e as leis de Kelvin e Laplace fornecem:

$$\psi = \rho_l \frac{R T}{M} \ln h = - \frac{2\sigma}{R_c} \quad (2.9)$$

onde:

ψ = potencial matricial capilar.

Tomando o ângulo de contacto α , Fig.2.3, a condição para existência do menisco implica em $R_c \geq \frac{r}{\cos \alpha}$.

Dessa condição de existência do menisco, observa-se que a condensação capilar só existirá, para um poro de raio r , para valores de umidade relativa maiores que um limite, chamado de limite de condensação capilar h_s , dado por:

$$h_s = \exp \left[\frac{- 2 \sigma M \cos \alpha}{\rho_l R T r} \right] \quad (2.10)$$

O limite h_s corresponde ao valor mínimo de umidade relativa no qual ocorre condensação capilar para o dado poro de raio r .

Também, para um valor de umidade relativa h_{lim} dado, existirá um limite r_{lim} para o raio de poro,

$$r_{lim} = - \frac{2 \sigma M \cos \alpha}{\rho_l R T \ln h_{lim}} \quad (2.11)$$

Poros com raio até r_{lim} apresentam água capilar, enquanto poros com raio superior a r_{lim} estão vazios.

Devemos ter em mente que esta é uma condensação puramente capilar, não levando em conta a existência de água adsorvida nas paredes dos poros.

No item seguinte consideraremos a adsorção fazendo abstração da água capilar e posteriormente será estudada a coexistência desses dois modos de condensação.

2.1.3 - TEORIAS DE ADSORÇÃO

Neste item, faz-se abstração da condensação capilar, considerando apenas a adsorção em superfícies planas. As três teorias apresentadas, foram criadas pensando em gases quaisquer, contudo, neste trabalho o interesse reside na adsorção de vapor de água. Salienta-se entretanto que a grande maioria de validações experimentais para as teorias são feitas com outros gases que não vapor de água.

2.1.3.1 - Teoria de Langmuir (1918)

Consideremos o esquema mostrado na Fig.2.4 onde S_m indica a superfície específica de uma parede sólida plana, S é a superfície recoberta de moléculas adsorvidas e $(S_m - S)$ a superfície livre.

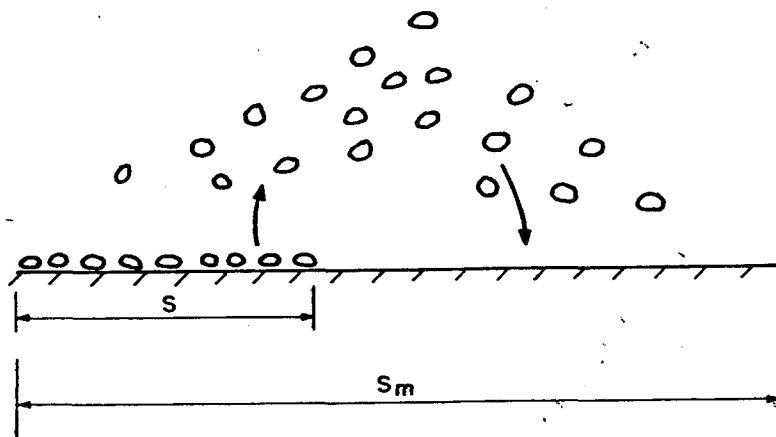


Fig.2.4 - Esquema para a teoria de Langmuir.

As moléculas adsorvidas são ligadas à parede sólida por forças de natureza não precisa [3], caracterizadas por uma energia de ligação por mol E_1 .

Segundo Langmuir [10] a quantidade de fluido adsorvido nas condições de equilíbrio é resultado da igualdade das taxas de evaporação e de condensação sobre a parede sólida.

A taxa de evaporação é proporcional à superfície S que

está recoberta de moléculas do fluido. A taxa de condensação é proporcional à superfície livre $(S_m - S)$ e à pressão relativa do vapor h .

A condição de equilíbrio é escrita na forma:

$$C h (S_m - S) = S \quad (2.12)$$

Considerando a distribuição de velocidades moleculares do gás regida pela repartição estatística de Maxwell-Boltzmann a constante C é:

$$C = \exp \left[-\frac{E_1}{RT} \right] \quad (2.13)$$

Utilizando a relação de proporcionalidade:

$$\frac{S}{S_m} = \frac{W}{W_m} \quad (2.14)$$

onde:

W = conteúdo mássico da fase condensada (adsorvida);

W_m = conteúdo mássico correspondente à formação de uma camada de moléculas, recobrindo toda a superfície sólida, obtém-se a relação:

$$\frac{W}{W_m} = \frac{C h}{1 + C h} \quad (2.15)$$

A uma dada temperatura a quantidade máxima de fluido adsorvido, W_{max} , será obtida para pressão relativa de saturação, $h = 1$, e se escreve:

$$W_{max} = \frac{C W_m}{1 + C} \quad (2.16)$$

Observamos da Eq.2.16 que W_{max} é menor que W_m , ou seja, a teoria de Langmuir não prevê a formação de uma camada de moléculas completa.

2.1.3.2 - Teoria BET (1938)

Como visto na seção anterior, a teoria de adsorção de Langmuir prevê apenas a formação incompleta de uma camada de moléculas, sendo um modelo monomolecular. Uma extensão desse modelo é dada pela teoria multimolecular BET, devida a Brunauer, Emmett e Teller [11].

Este modelo é fundamentado nas seguintes hipóteses:

- a superfície dos poros é recoberta por várias camadas sucessivas de moléculas com áreas decrescentes Fig.2.5;
- as moléculas da primeira camada estão ligadas à parede sólida pela energia molar E_1 ;
- as moléculas das outras camadas, a partir da segunda, possuem energia de ligação E_l , igual ao calor molar latente de vaporização, $E_l < E_1$;
- o equilíbrio resulta da igualdade sucessiva das taxas de evaporação das camadas de ordem i e de condensação sobre as camadas de ordem $i-1$ Fig.2.5;
- o número de camadas adsorvidas não depende da dimensão dos poros.

A equação resultante para este modelo é dada por:

$$\frac{W}{W_m} = \frac{C h}{(1-h) (1-h+C h)} \quad (2.17)$$

onde:

$$C = \exp \left[\frac{E_1 - E_l}{R T} \right]$$

A Eq.2.17 diverge, fornecendo um conteúdo adsorvido infinito para $h = 1$; sua utilização é limitada a valores médios de h .

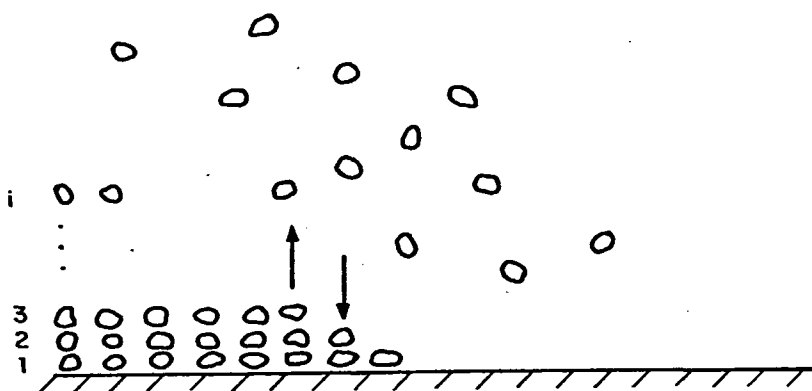


Fig.2.5 - Esquema para o modelo BET.

2.1.3.3 - Teoria GAB

Este modelo foi estabelecido independentemente por Guggenheim, Anderson e De Boer [12]. Ele é uma extensão da teoria BET na medida em que leva em conta um calor de adsorção E_m para todas as camadas moleculares (que não a primeira) diferente do calor molar latente de vaporização E_l .

A isoterma GAB é escrita como:

$$\frac{W}{W_m} = \frac{C' K h}{(1-K h) (1-K h + C' K h)} \quad (2.18)$$

onde:

$$C' = \exp \left[\frac{E_l - E_m}{R T} \right],$$

$$K = \exp \left[\frac{E_l - E_m}{R T} \right]$$

Note-se que fazendo $E_m = E_l$, o que torna $K = 1$, a Eq.2.18 se reduz à Eq.2.17.

Como na teoria BET, a utilização do modelo GAB é restrita até valores médios de pressão relativa de vapor, devido

a não levar em consideração a condensação capilar, que modifica a isoterma de adsorção em materiais como a argamassa.

Entretanto, a equação GAB é uma excelente ferramenta para o ajuste matemático das isotermas experimentais sobre quase todo o domínio de h ; ver [4] p.36, fornecendo assim uma expressão para $W = W(h)$.

Na Fig.2.6 pode-se visualizar o comportamento das três isotermas estudadas.

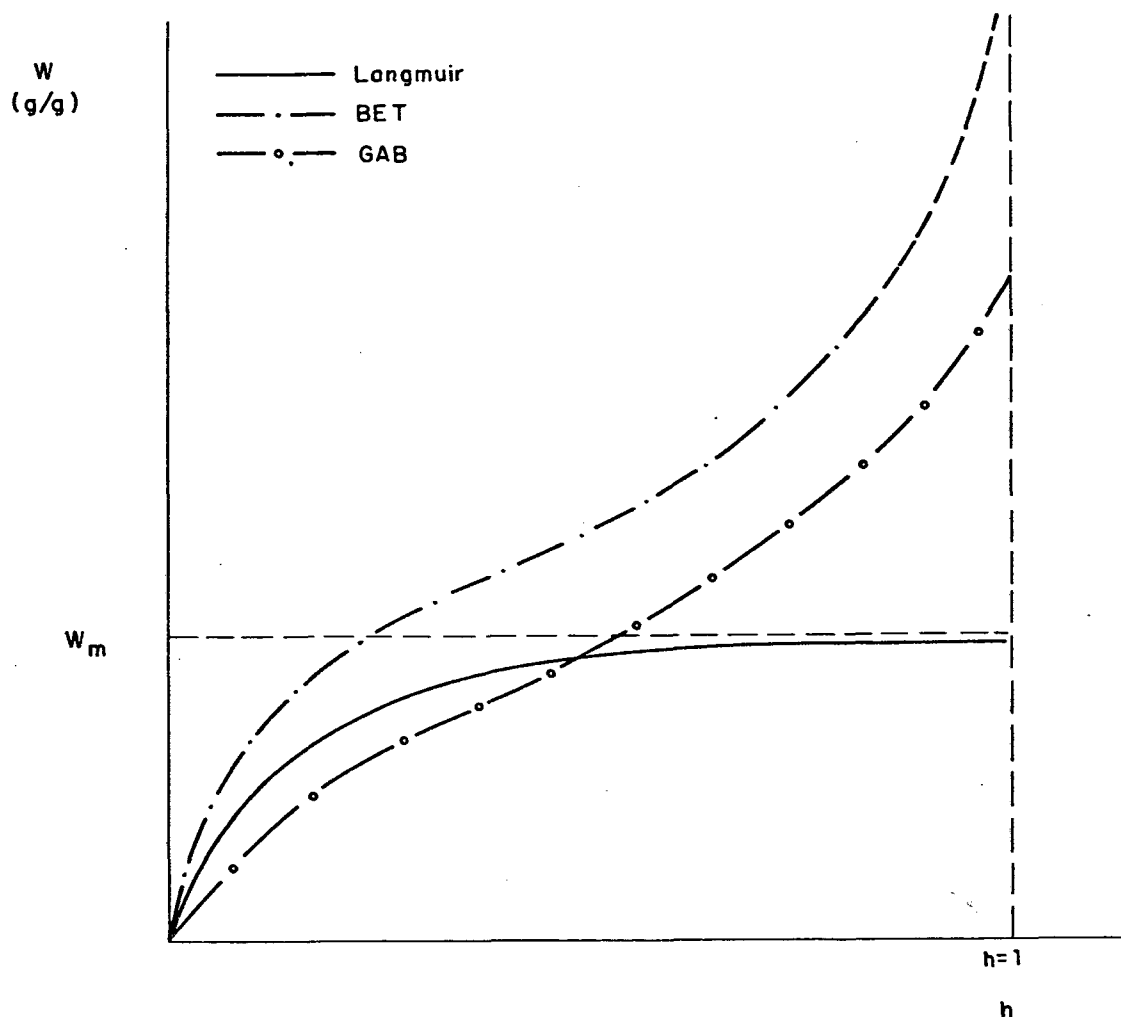


Fig.2.6 - Comparação dos três modelos de adsorção.

2.1.4 - COEXISTÊNCIA DOS DOIS MODOS DE CONDENSAÇÃO

Como foi visto, as teorias de adsorção são insuficientes para explicar o comportamento das isotermas experimentais para meios porosos, devido ao fenômeno da condensação capilar previsto pela lei de Kelvin.

De fato, ocorre condensação capilar em um núcleo do poro quando a umidade relativa alcança o limite descrito na seção 2.1.2, coexistindo com a água que foi adsorvida em umidades menores que o valor limite.

Nas teorias de adsorção estudadas, a quantidade de água adsorvida não é função do raio do poro, mas apenas da umidade relativa, não levando em conta a condensação capilar.

Para explicar a sucessão destes dois modos de condensação, Defay e Prigogine [13], ver também Merouani[4], consideraram um poro isolado cilíndrico e com perfeita molhabilidade como representado na Fig.2.7.

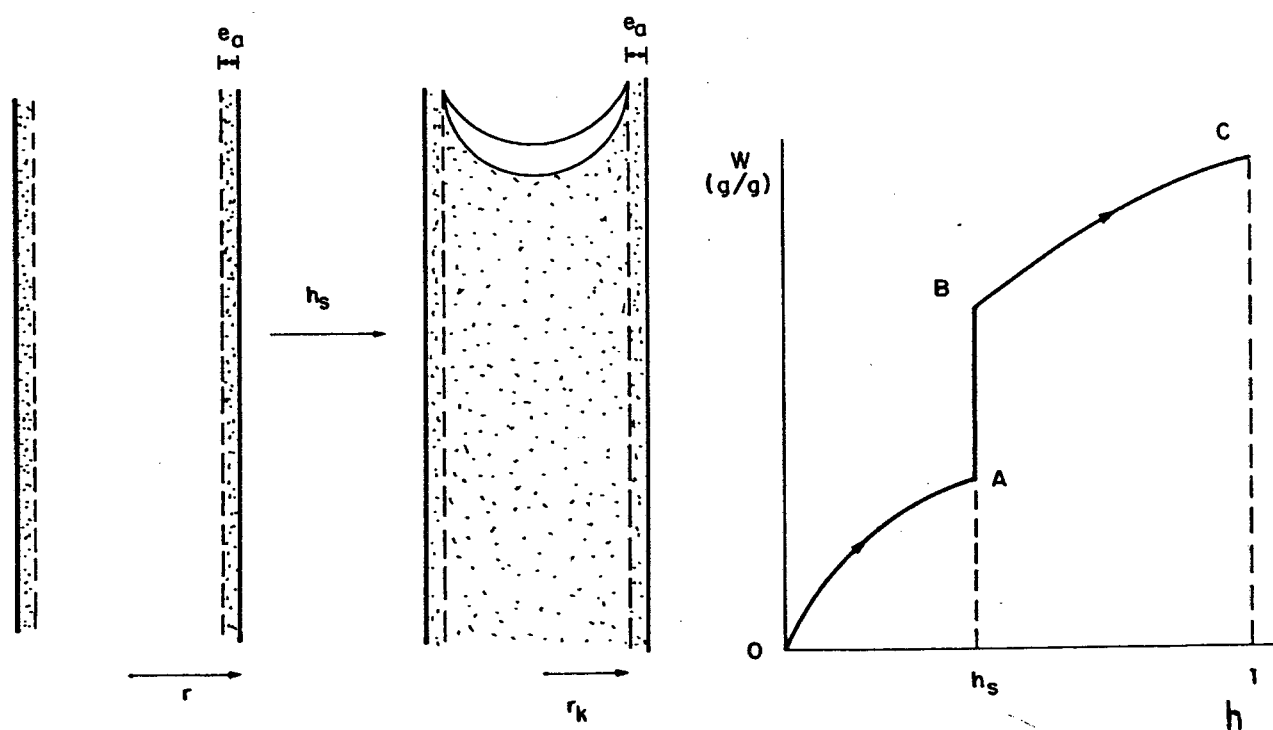


Fig.2.7 - Sucessão dos modos de condensação em um poro cilíndrico isolado.

Partindo-se da umidade relativa nula (ponto 0 no gráfico da Fig.2.7) e aumentando-a progressivamente, os fenômenos ocorrerão como se segue:

- Do aumento da umidade relativa de 0 até A há um aumento da espessura da camada adsorvida;
- Em A, a espessura da camada adsorvida é tal, que o núcleo no centro do poro de raio r_k é capaz de conter um menisco

esférico, ou seja, ocorre a condensação capilar. A relação entre o limite de condensação h_e e o raio r do poro, levando-se em conta a existência da espessura adsorvida e_a , é dada por:

$$r_k = r - e_a(h_e) = - \frac{2 \sigma M}{\rho_l R T \ln h_e} \quad (2.19)$$

- De B até C ocorre o aplainamento do menisco;
- Em C, o menisco é plano e o poro está saturado ($h = 1$).

A questão da ocorrência do aplainamento do menisco é controvertida; neste trabalho isto não será analisado, restringindo-se apenas à apresentação do modelo de Defay e Prigogine.

A Fig.2.8 mostra uma isoterma de adsorção-dessorção típica de um meio poroso, como por exemplo a argamassa de cal e cimento.

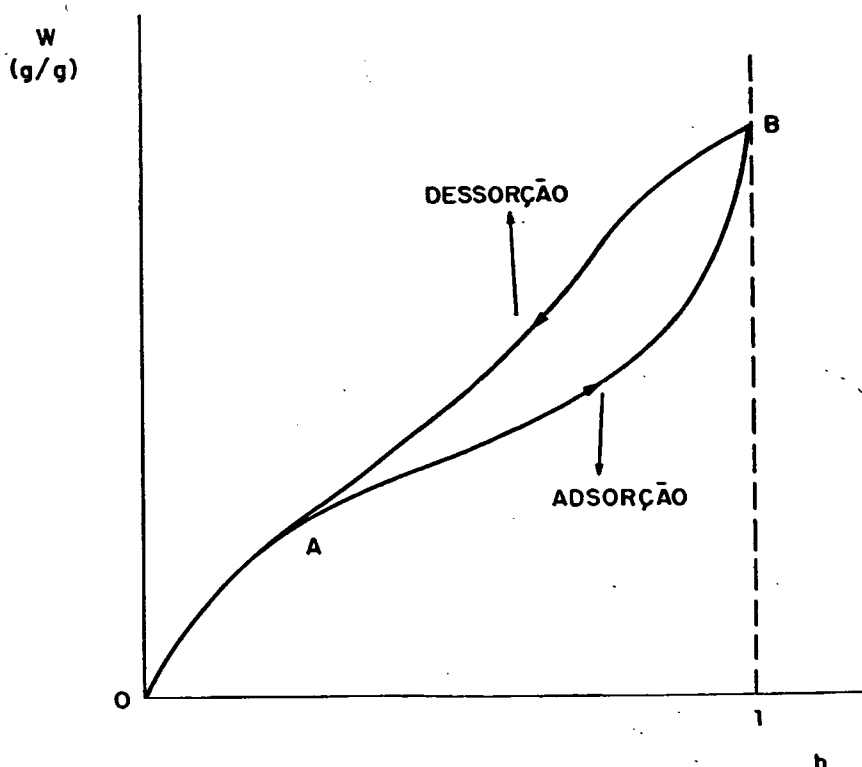


Fig.2.8 - Isoterma de adsorção-dessorção de um meio poroso.

Geralmente, os meios porosos apresentam uma gama muito variada de raios de poros. Segundo a definição adotada por Merouani [4], eles são assim classificados:

- Microporos: aqueles com raio inferior a 20 Å;
- Mesoporos: com raio entre 20 a 500 Å;
- Macroporos: com raio superior a 500 Å.

Uma interpretação qualitativa da isoterma de adsorção-desorção mostrada na Fig.2.8 seria:

- A parte OA corresponde a um aumento da espessura de camada adsorvida em todos os tipos de poros;
- No ponto A ocorre condensação capilar nos poros mais finos;
- Na região compreendida entre os pontos A e B ocorre condensação capilar em poros maiores, de volumes representativos, o que explica o crescimento abrupto do conteúdo de umidade. Contudo, haverá poros suficientemente grandes tal que não ocorra condensação capilar, mas apenas aumento da camada adsorvida;
- No ponto B, $h = 1$, ocorre a saturação de todos os poros. Deve-se observar que esta saturação poderá ser incompleta, devido existência de ar (ver seção 1.5).

Uma análise quantitativa desses fenômenos é dada pelo modelo de condensação dito B.J.H., devido a Barret, Joyner e Hallenda [14], que será apresentado na seção 2.1.6.

2.1.5 - O FENÔMENO DA HISTERESE

Na Fig.2.8 pode-se observar comportamentos diferentes para as isotermas de adsorção e dessorção. Nos ensaios de adsorção as amostras secas são submetidas a umidades relativas diferentes havendo condensação nos poros do material. Em dessorção, parte-se de amostras saturadas havendo portanto evaporação de água. A histerese parece ocorrer apenas no domínio de umidades relativas onde há condensação capilar, não acontecendo na região de adsorção pura (parte OA da Fig.2.8).

Fundamentado em Merouani [4], apresenta-se duas

hipótese para explicar a histerese:

- Uma primeira é devida aos diferentes ângulos de contacto nos processos de adsorção e dessorção. Em adsorção diz-se que o ângulo de contacto α_{ads} "avança" devido à condensação no menisco, Fig.2.9. Em dessorção o ângulo de contacto α_{des} "recua", devido à evaporação.

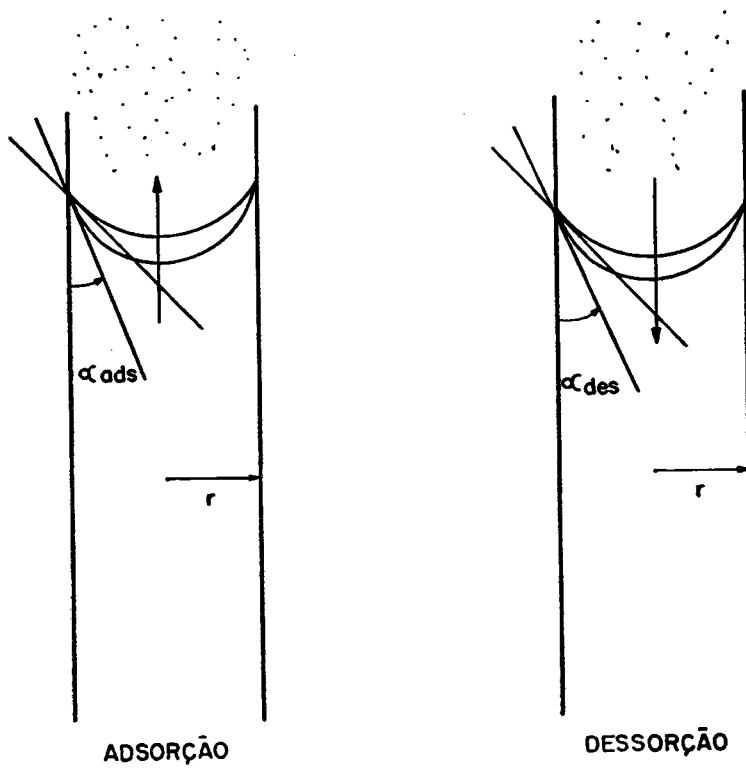


Fig.2.9 - Diferentes ângulos de contacto no processos de adsorção-dessorção para um poro cilíndrico de raio r .

Nota-se então que $\alpha_{ads} > \alpha_{des}$ e dessa maneira os limites de condensação (ou evaporação) capilar, Eq.2.10, obedecerão a relação $h_{ads} > h_{des}$.

- Uma segunda hipótese é a existência de tipos de poros

peculiares com uma formação como esquematizada na Fig.2.10; doravante essas formações serão denominadas "com garganta".

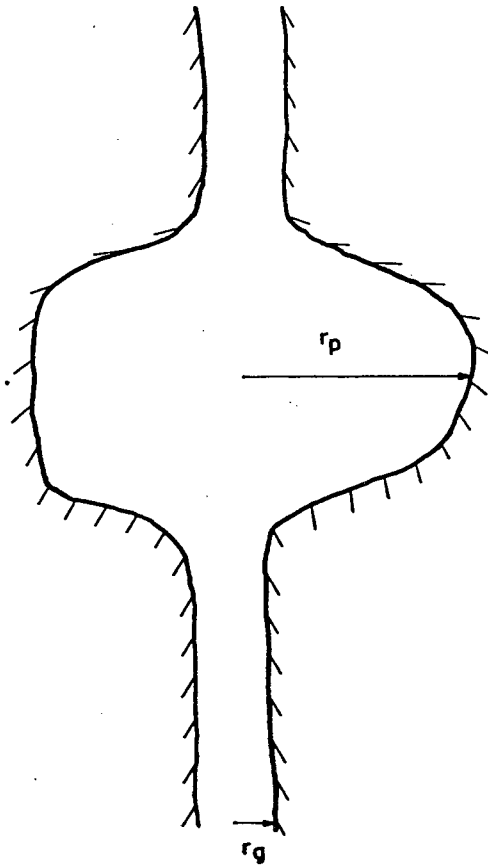


Fig.2.10 - Formação de poro "com garganta".

Quando do processo de adsorção o poro de raio r_p ($r_p > r_g$) se preencherá com água para:

$$h_{ads} = \exp \left[- \frac{2 \sigma M}{\rho_l R T r_p} \right], \text{ mas,}$$

em dessorção ele apenas se esvaziará quando a umidade relativa atender ao limite correspondente ao raio r_g :

$$h_{des} = \exp \left[- \frac{2 \sigma M}{\rho_l R T r_g} \right], \text{ donde}$$

se observa que $h_{ads} > h_{des}$.

Na Fig.2.11 mostra-se a nível de um poro, a histerese como explicada pelas duas hipóteses.

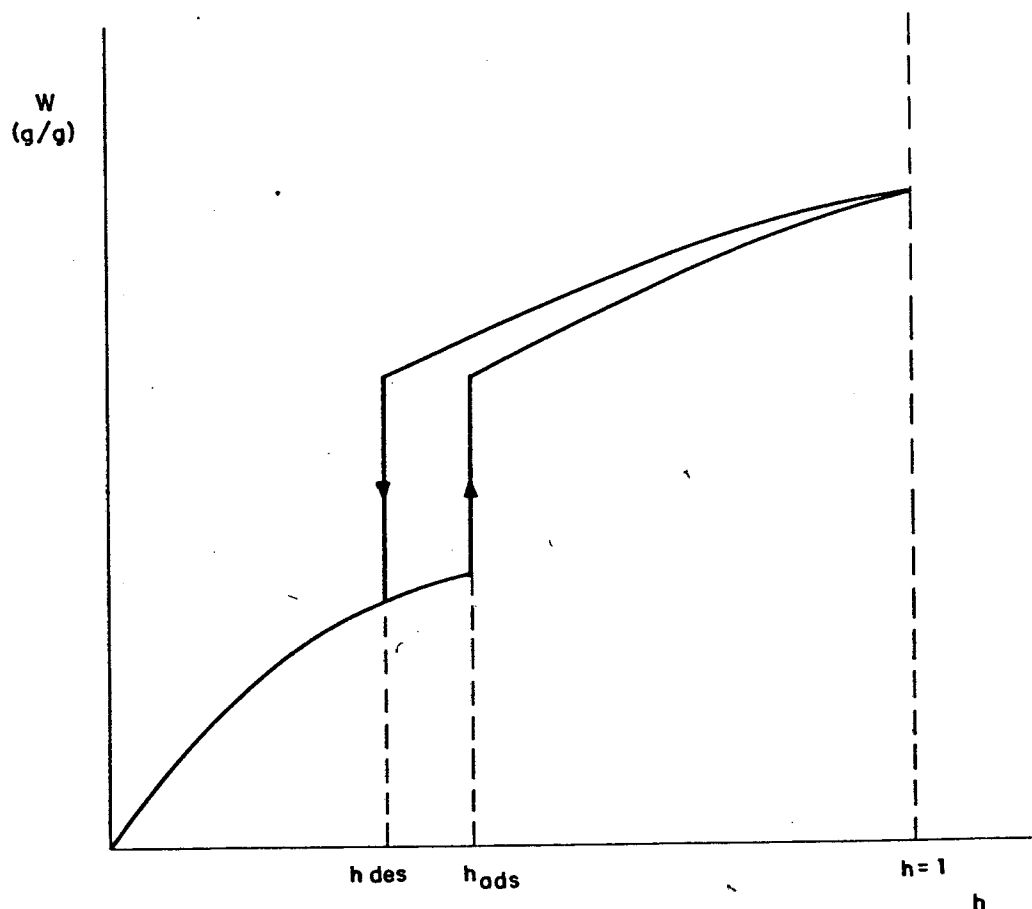


Fig.2.11 - Histerese a nível de um poro.

2.1.6 - O MODELO B.J.H. (Barret, Joyner e Hallenda [14]) (1951)

O comportamento global das isotermas de adsorção-dessorção está diretamente ligado à estrutura porosa do material, ou seja, à distribuição de superfícies e volumes dos poros em função de seus raios.

A idéia de origem do modelo B.J.H. é obter as informações da estrutura porosa a partir da isotermas. Daian [3]

sugeriu a obtenção das isotermas com base numa determinação prévia do espectro poroso.

O modelo B.J.H. separa quantitativamente a água adsorvida da capilar, que compõem o conteúdo total a uma dada umidade relativa.

Considere-se um meio poroso constituído de poros cilíndricos onde são adotadas as seguintes hipóteses:

- Não existem formações "com garganta", como a mostrada na Fig.2.10; o meio poroso é assumido como um feixe de poros cilíndricos de raios variados, não existindo conexão entre eles;
- Concordância tangencial das interfaces capilares com a camada adsorvida no limite de condensação (ou evaporação) capilar.

Das hipóteses adotadas acima, observa-se que o modelo B.J.H. é não-histerético.

Suponha-se agora que o meio poroso (feixe de poros cilíndricos) seja submetido a um incremento Δh de umidade relativa, passando de h para $h + \Delta h$.

Quando isto ocorre, uma classe de poros de raios r a $r + \Delta r$ se preencherá com água capilar (Fig.2.12).

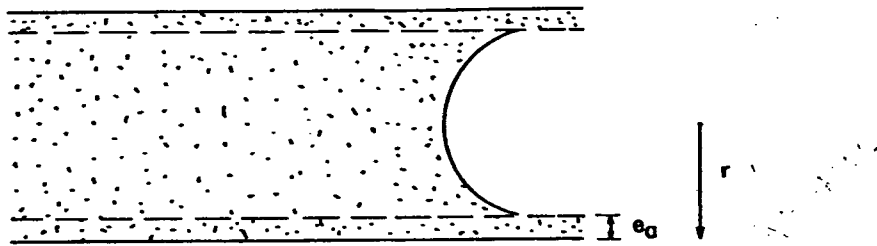


Fig.2.12 - Poro preenchido com água capilar.

Isto significa que todos os poros dessa classe (com raios de r a $r + \Delta r$) apresentam um núcleo no seu centro, de raio $r - e_a$, capaz de conter um menisco capilar para a umidade relativa $h + \Delta h$.

O conteúdo de água condensada capilarmente, $\Delta \theta_{cop}$, será dado por:

$$\Delta e_{cap} = \frac{\Delta S_r}{2} \left(r - e_a \right) \left(\frac{r - e_a}{r} \right) \quad (2.20)$$

onde:

ΔS_r = superfície lateral dessa classe de poros.

Assumindo $r \gg e_a$, podemos escrever a Eq.2.20 como:

$$\Delta e_{cap} = \frac{\Delta S_r}{2} \left(r - e_a \right) \quad (2.21)$$

A Eq.2.21 indica que se assumiu a superfície lateral dos poros de raio r igual à superfície dos núcleos de raio $r - e_a$.

Os poros com raio superior a essa classe, terão apenas um aumento na espessura da camada adsorvida, pois $h + \Delta h$ não é suficiente para provocar a condensação capilar (Fig.2.13).

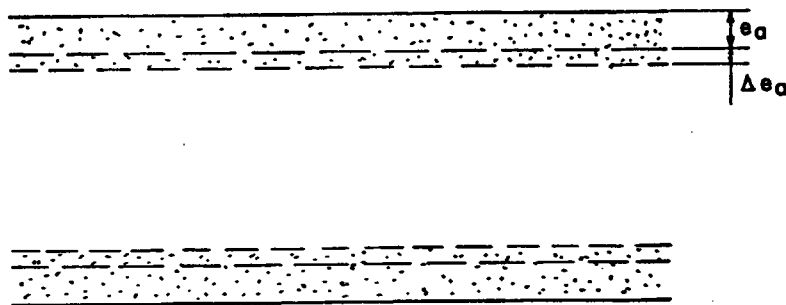


Fig.2.13 - Aumento da espessura da camada adsorvida nos poros com raio superior a $r + \Delta r$.

Suponhamos ainda que N poros com raios r, r_1, \dots, r_{N-1} são os que tiveram aumento na espessura da camada adsorvida.

Portanto, o volume de água associado ao acréscimo Δe_a na camada adsorvida é:

$$\Delta\theta_{ads} = \pi \left\{ \left(r - e_a \right)^2 - \left[\left(r - e_a \right) - \Delta\theta_a \right]^2 + \dots + \right. \\ \left. + \left(r_{N-1} - e_a \right)^2 - \left[\left(r_{N-1} - e_a \right) - \Delta\theta_a \right]^2 \right\} \quad (2.22)$$

Devemos observar que se assumiu a espessura da camada adsorvida função apenas da umidade relativa, independente do raio do poro.

A Eq.2.22 pode ser escrita como:

$$\Delta\theta_{ads} = 2\pi \Delta\theta_a \left[\left(r + r_1 + \dots + r_{N-1} \right) - N \left(e_a + \frac{\Delta\theta_a}{2} \right) \right] \quad (2.23)$$

Assumindo $\left(r + r_1 + \dots + r_{N-1} \right) \gg N \left(e_a + \frac{\Delta\theta_a}{2} \right)$, vem:

$$\Delta\theta_{ads} = \Delta\theta_a \left[2\pi r + 2\pi r_1 + \dots + 2\pi r_{N-1} \right],$$

ou:

$$\Delta\theta_{ads} = \Delta\theta_a \cdot S(r) \quad (2.24)$$

onde,

$S(r)$ = superfície acumulada dos poros com raio maior que r .

O aumento de conteúdo total $\Delta\theta$ associado ao incremento

Δh será:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{cap} + \Delta\theta_{ads} = \frac{\Delta S_r}{2} \left(r - e_a \right) + S(r) \Delta\theta_a \quad (2.25)$$

Mais tarde, quando do seu uso, será explicado como a Eq.2.25 é utilizada para a determinação de estruturas porosas.

2.2 - ESTUDO EXPERIMENTAL

Descreve-se na presente seção, o procedimento experimental para a obtenção das isotermas de adsorção-dessorção à temperatura de 25°C da argamassa de cal e cimento.

Discorre-se sobre as seguintes questões:

- preparação das amostras;
- condição higrotérmica nos dessecadores;
- modo de obtenção da umidade de equilíbrio;
- resultados obtidos;
- fontes de erros.

No capítulo seguinte será analisado o comportamento das isotermas relacionando-as com a estrutura porosa do material.

2.2.1 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para este ensaio, utilizou-se pequenas placas de argamassa, obtidas serrando-se algumas amostras cilíndricas (seção 1.1).

É importante que seja elevada a razão entre a área superficial e o volume das amostras, para que se possa obter a condição de equilíbrio em um pequeno intervalo de tempo. Para tanto, confeccionou-se amostras com espessuras em torno de 3 a 4 mm, com seção retangular 100 x 50 mm². Além do processo de serragem, as amostras são levemente lixadas e lavadas, para que se retire o pó da superfície.

É importante observar, que dada a grande área superficial e pequena espessura, a questão da carbonatação, seção 1.2, é crítica nesse tipo de ensaio.

Decidiu-se trabalhar com as amostras completamente carbonatadas: conseguiu-se isto, deixando-as por um intervalo de tempo suficiente em exposição ao ar livre; algumas amostras foram retiradas do lote e submetidas ao teste com fenolftaleína.

No capítulo 6, serão discutidas as implicações do uso de amostras carbonatadas no ensaio de adsorção-dessorção para o trabalho como um todo.

No ensaio de adsorção as amostras foram secadas, como descrito na seção 1.3, e colocadas em um dessecador grande, contendo sílica-gel, até o abaixamento de temperatura para 25 ± 1 °C.

Para a dessorção, após a determinação da massa seca, as amostras são imersas em água destilada à pressão atmosférica e temperatura de 25 ± 1 °C para a saturação.

2.2.2 - CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS NOS DESSECADORES

A umidade relativa no interior dos dessecadores é mantida com o uso de soluções salinas saturadas com corpo de fundo.

No apêndice A são apresentadas as soluções utilizadas e o valor de umidade relativa que elas mantêm a 25°C em concordância com a norma francesa NF X 15-014, Merouani [4].

O uso dessas soluções apresenta duas vantagens, Merouani [4]:

- fraca sensibilidade à variação de temperatura (ver apêndice A);
- desde que a solução se mantenha saturada não há variação da umidade relativa.

Utilizou-se nove soluções abrangendo a faixa de 8 a 97% de umidade relativa à temperatura de 25°C.

Os dessecadores são previamente colocados em uma estufa a temperatura controlada para que entrem em equilíbrio térmico à temperatura de 25°C.

A monitoração da temperatura é feita com termômetro de vidro-mercúrio (resolução de 0,05°C) com o bulbo posicionado no centro geométrico da estufa. Com este termômetro, na posição citada, observou-se uma variação de $\pm 0,1$ °C.

2.2.3 - MODO DE OBTENÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO

As amostras são mantidas nos dessecadores (onde estão definidas as condições de umidade relativa e temperatura) até a obtenção da massa de equilíbrio. O intervalo de tempo requerido para a obtenção dessa condição de equilíbrio varia em função do

tipo de ensaio: para dessorção, de 4 a 5 semanas; para adsorção, de 3 a 4 semanas.

Para um mesmo ensaio, esse intervalo de tempo é função da umidade relativa e espessura da amostra, a qual não é perfeitamente constante para o conjunto.

As massas são medidas a cada 5 ou 7 dias, com balança digital (resolução 10^{-2} g), até a sua estabilização. Um por vez, os dessecadores são retirados da estufa e medida a massa da amostra.

Haverá uma perturbação ligeira da umidade relativa no dessecador quando de sua abertura, e transferência de massa entre a amostra e o meio ambiente durante o intervalo de tempo necessário à pesagem. No entanto, para a balança utilizada, e o pequeno intervalo de tempo de medição, não é notada variação de massa.

Num experimento prévio, utilizou-se duas amostras para cada dessecador, e obteve-se uma boa reprodutibilidade dos resultados.

Decidiu-se, então, utilizar apenas uma amostra por dessecador, com o benefício de que ele (dessecador) permanece menos tempo aberto durante as pesagens.

Para a umidade relativa de 97% há condensação de água na tampa do dessecador. A amostra foi então protegida com um "chapéu" de plástico; isto evita que a água condensada pingue sobre ela. O ensaio de adsorção a 97% de umidade relativa foi repetido duas vezes, encontrando-se boa correlação nos resultados.

Na Fig.2.14 são mostradas algumas fotografias do aparato experimental utilizado na obtenção das isotermas de adsorção e dessorção.

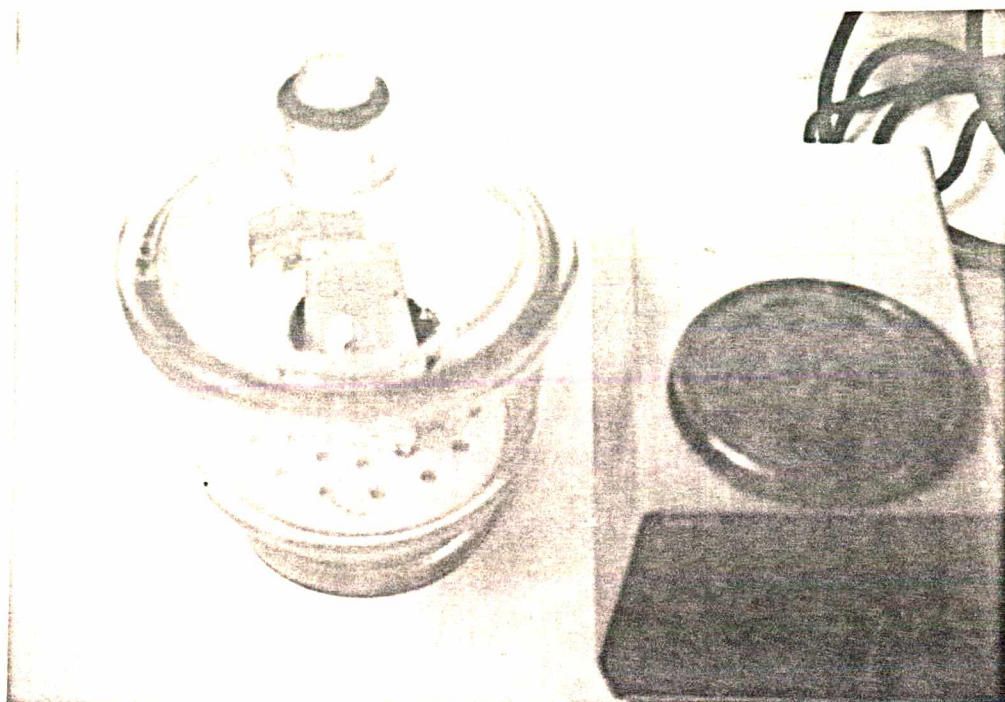


Fig.2.14 - Fotografias do aparato experimental utilizado na determinação das isotermas de adsorção-dessorção.

2.2.4 - RESULTADOS OBTIDOS

A Fig.2.15 mostra os pontos experimentais obtidos para os ensaios de adsorção e dessorção. Para o ajuste matemático desses pontos, utilizou-se as equações BET e GAB, como descritas nas seções 2.1.3.2 e 2.1.3.3, respectivamente.

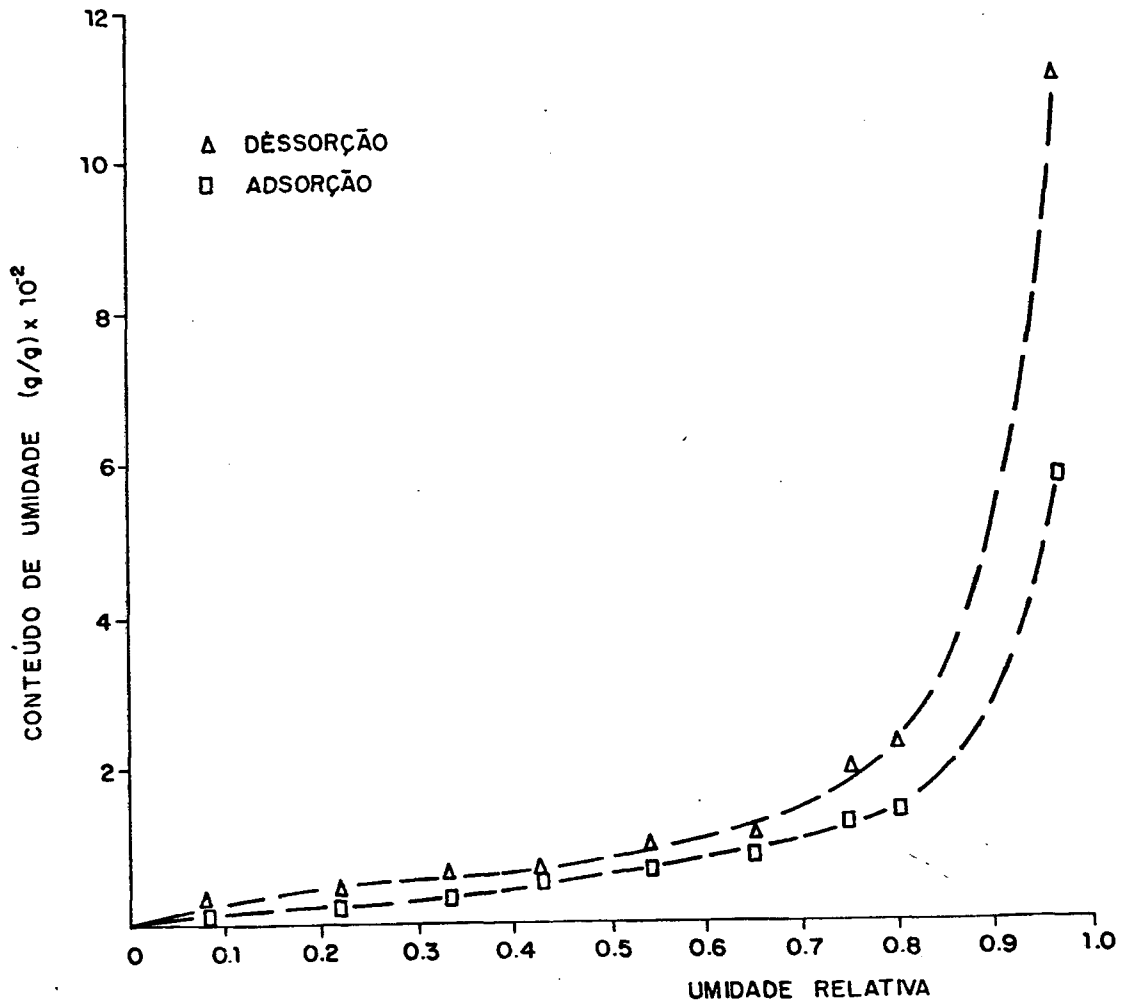


Fig.2.15 - Pontos experimentais adsorção-dessorção.

O ajuste GAB é feito escrevendo-se a Eq.2.18 na forma:

$$W = \frac{h}{u_1 h^2 + u_2 h + u_3} \quad (2.26)$$

onde:

$$u_1 = \frac{K(1 - C')}{C'W_m} ; \quad u_2 = \frac{C' - 2}{C'W_m} ; \quad u_3 = \frac{1}{C'KW_m}$$

Os parâmetros u_1 , u_2 e u_3 são determinados por regressão quadrática a partir dos pontos experimentais o que permite obter os valores de C' , K e W_m .

O ajuste através do modelo BET, donde se obtém os valores de C e W_m , é feito com a Eq.2.17 escrita na forma da Eq.2.26 porém com $K = 1$.

Para os dois ajustes citados, além dos pontos experimentais, utilizou-se o de umidade relativa nula, onde assumiu-se conteúdo de umidade nulo, $W(h = 0) = 0$.

A equação GAB permitiu um bom ajuste em todo o domínio de umidade relativa, enquanto que a equação BET apenas até medios valores de umidade, em torno de 55%.

Nas figuras que se seguem (Fig.2.16, 2.17, 2.18 e 2.19) são mostradas separadamente os pontos experimentais, para adsorção e dessorção, em confronto com as curvas ajustadas GAB e BET. Ao lado da figura, apresentam-se os valores de C' , W_m e K (este apenas para GAB) obtidos do ajuste.

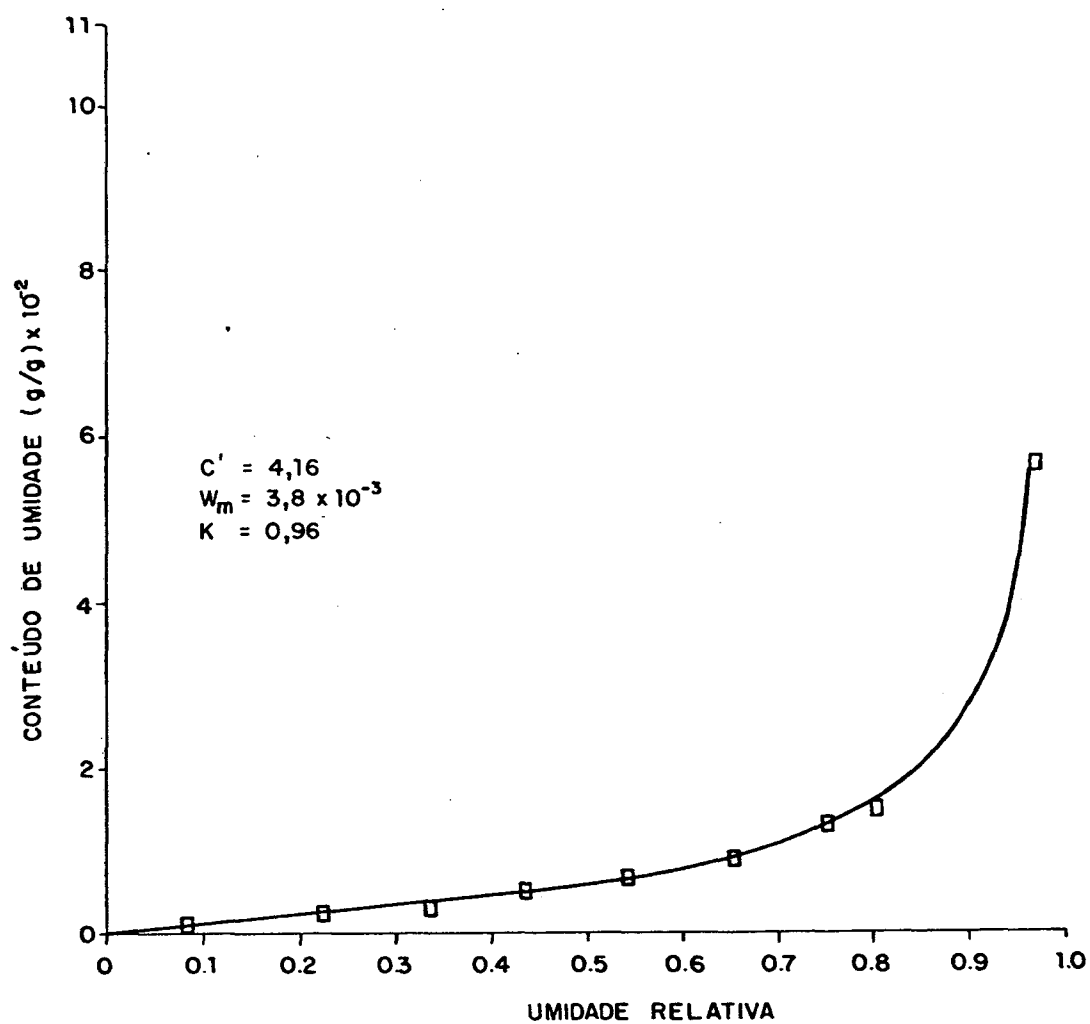


Fig.2.16 - Comparação entre os pontos experimentais de adsorção e o ajuste através do modelo GAB.

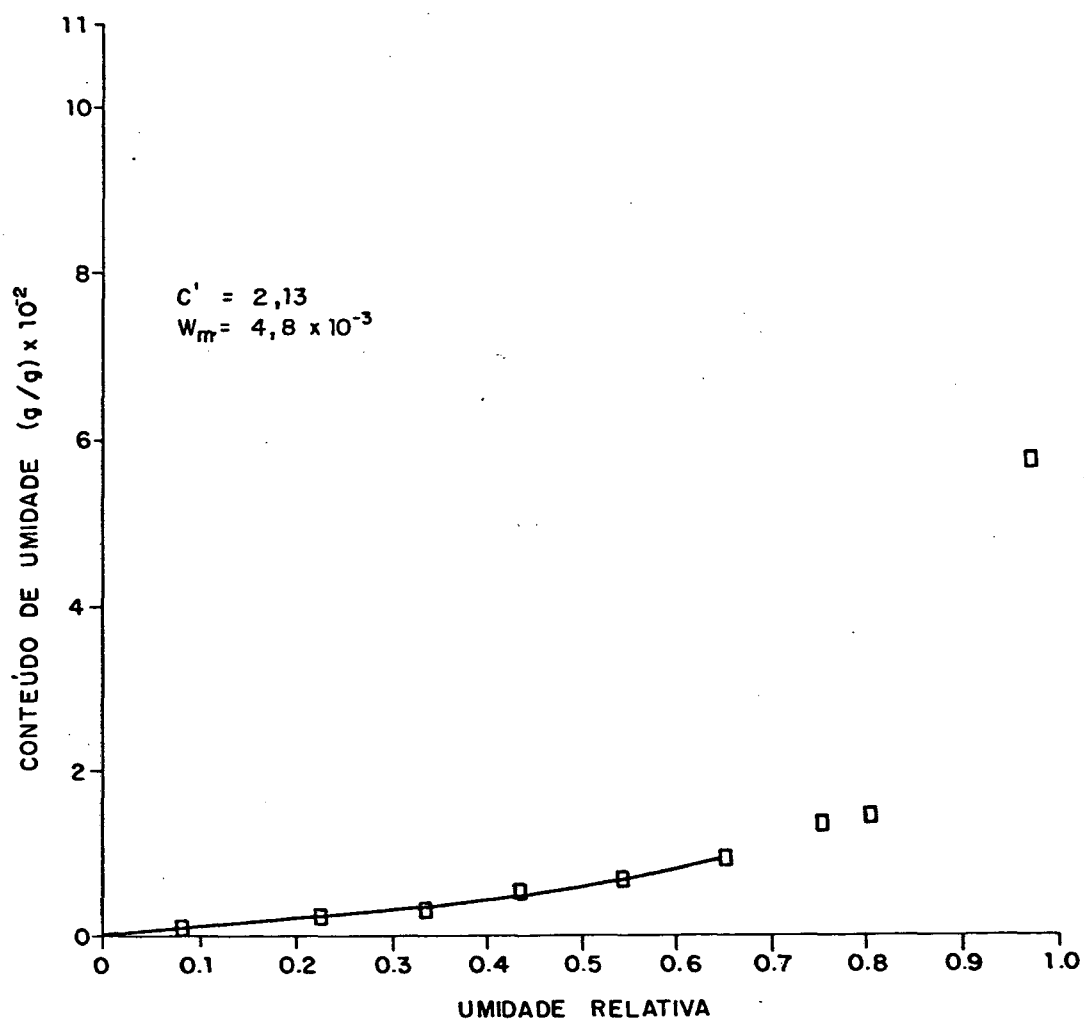


Fig.2.17 - Comparação entre os pontos experimentais de adsorção e o ajuste através do modelo BET.

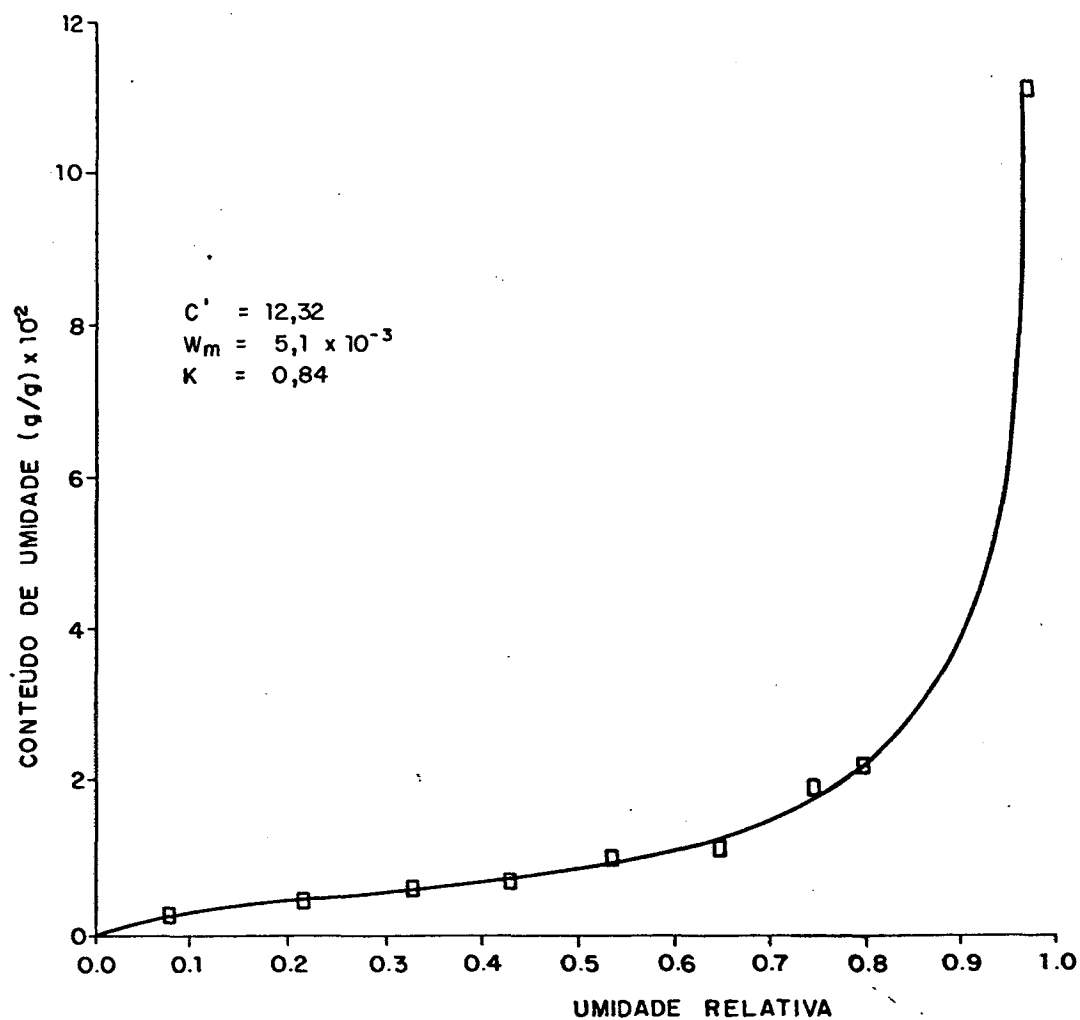


Fig.2.18 - Comparação entre os pontos experimentais de dessorção e o ajuste através do modelo GAB.

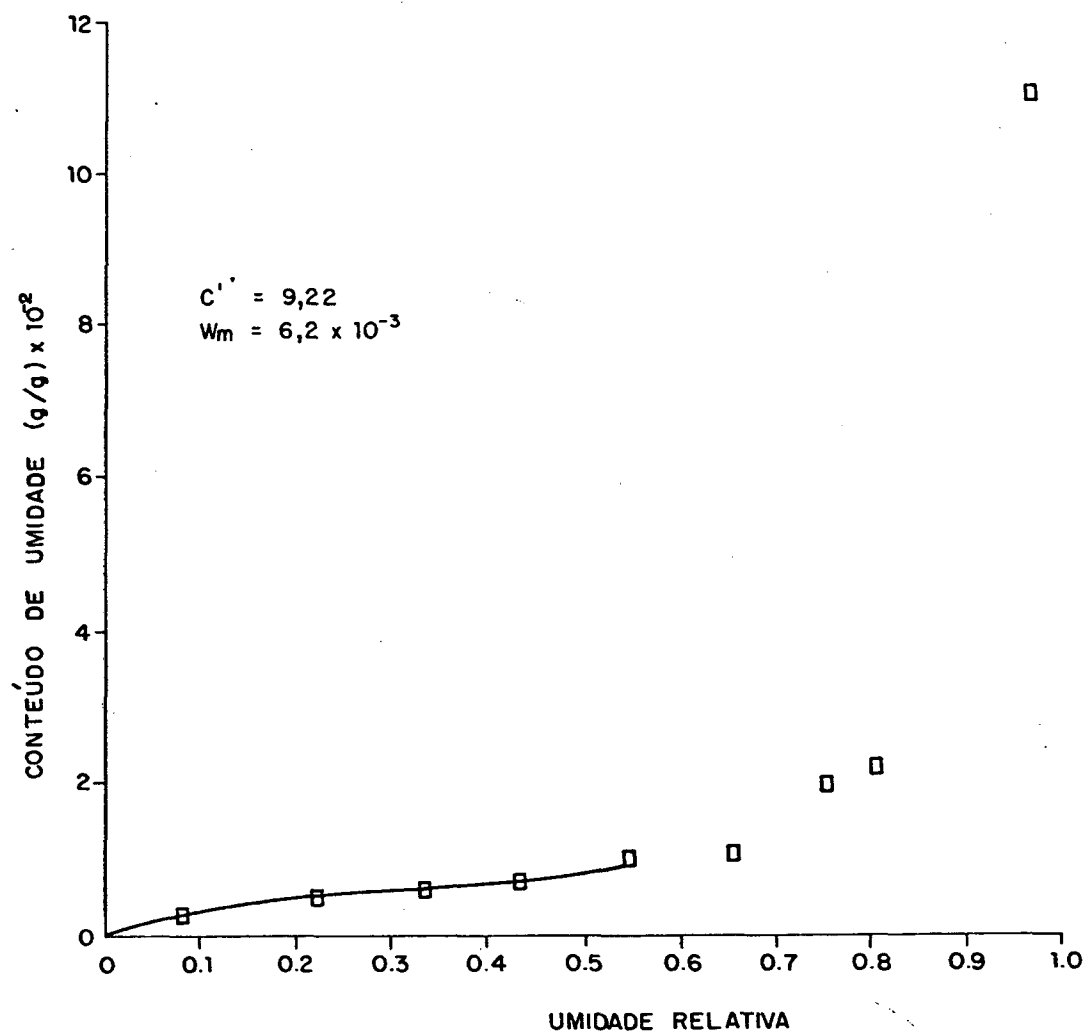


Fig.2.19 - Comparação entre os pontos experimentais de dessorção e o ajuste pelo modelo BET.

2.2.5 - QUALIDADE DO AJUSTAMENTO MATEMÁTICO

Esta qualidade foi estimada através do coeficiente de correlação linear, [4]:

$$CCL = \frac{(\sum W_i W_i^* - N \bar{W} \bar{W}^*)}{\left[(\sum W_i^2 - N \bar{W}^2) (\sum W_i^{*2} - N \bar{W}^{*2}) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

onde:

W_i = valores experimentais;

W_i^* = valores ajustados;

\bar{W}, \bar{W}^* = valores médios correspondentes;

N = número de pontos experimentais.

Os valores obtidos para o coeficiente de correlação são de 0,9992 e 0,9872 para os modelos GAB e BET respectivamente, o que parece indicar um bom ajuste matemático.

2.2.6 - ANÁLISE DE ERROS

O conteúdo de umidade para um dado estado de equilíbrio, é obtido a partir da massa seca e da massa úmida:

$$W = \frac{m_{ue} - m_{seca}}{m_{seca}}$$

onde:

W = conteúdo de umidade mássico;

m_{ue} = massa úmida no equilíbrio;

m_{seca} = massa seca.

Um erro Δm nas medições de m_{ue} e m_{seca} provocará um erro absoluto ΔW no conteúdo de umidade, que pode variar entre um valor mínimo e um máximo:

$$\Delta W_{\max} = \frac{\left[m_{ue} + \Delta m \right] - \left[m_{seca} - \Delta m \right]}{\left[m_{seca} - \Delta m \right]} - W,$$

ou,

$$\Delta W_{\max} = \frac{\frac{\Delta m}{m_{seca}} (2 + W)}{1 - \frac{\Delta m}{m_{seca}}} \quad (2.27);$$

$$\Delta W_{\min} = W - \frac{\left[m_{ue} - \Delta m \right] - \left[m_{seca} + \Delta m \right]}{\left[m_{seca} + \Delta m \right]},$$

$$\Delta W_{\min} = \frac{\frac{\Delta m}{m_{seca}} (2 + W)}{1 + \frac{\Delta m}{m_{seca}}} \quad (2.28)$$

Assumiu-se um erro nas medições de massa igual a $\pm 0,01$ g. e visto que o valor de m_{seca} é da ordem de 25 g, tem-se $\Delta m/m_{seca} \ll 1$, de modo que as Eqs.(2.27) e (2.28) se tornam idênticas a:

$$\Delta W = \frac{\Delta m}{m_{seca}} (2 + W) \quad (2.29)$$

Na Fig.(2.20) apresenta-se um gráfico do erro absoluto ΔW em função de W .

Outras fontes de erros importantes, além do de medição de massa, avaliado anteriormente são:

- a variação de temperatura, no espaço e no tempo, no interior da estufa;
- as perturbações provocadas na temperatura e umidade relativa durante o tempo das pesagens, devido a abertura da estufa e dos dessecadores.

Esses erros, são de difícil avaliação, e isso não será feito neste trabalho.

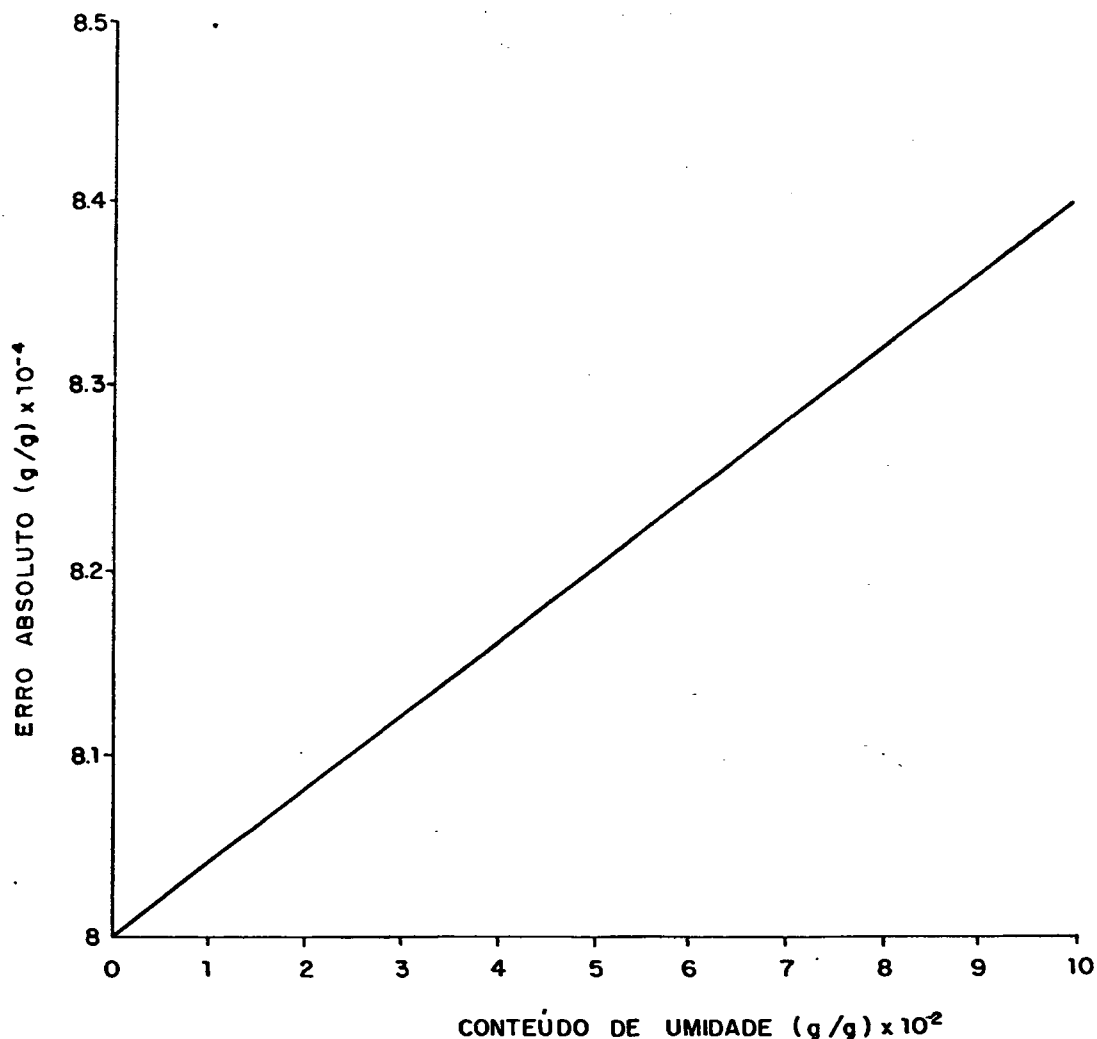


Fig.2.20 - Erro absoluto na medição de massa para a determinação do conteúdo de umidade.

CAPÍTULO 3

3 - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA POROSA DA ARGAMASSA E DO SEU COMPORTAMENTO FRENTE A ÁGUA EM CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO HIGROTÉRMICO

Neste capítulo, a estrutura porosa da argamassa é investigada com o uso de porosimetria com injeção de mercúrio.

O método é apresentado e os problemas relativos à interpretação dos resultados são discutidos.

Para os poros de raio menor que 240 Å (inacessíveis ao porosímetro utilizado) a determinação foi feita utilizando a isoterma de adsorção experimental e o modelo B.J.H., descrito na seção 2.1.6.

O espectro poroso é analisado bem como sua influência no comportamento da argamassa com relação à água em condições de equilíbrio.

3.1 - POROSIMETRIA COM INJEÇÃO DE MERCÚRIO

3.1.1 - PRINCÍPIO DO MÉTODO

Este é um método clássico, e largamente utilizado, para a investigação de estruturas porosas.

Como será visto, é de fácil utilização, todavia apresenta problemas quanto à interpretação dos seus resultados.

A idéia básica consiste em injetar um fluido não molhante, como o mercúrio, no meio poroso previamente submetido à vácuo.

Seja um poro cilíndrico de raio r contendo mercúrio, Fig.3.1. A lei de Laplace para a descontinuidade de pressão no menisco esférico convexo é:

$$p_i - p_o = - \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r} \quad (3.1)$$

onde, para o mercúrio é assumido [4]:

$$\sigma = 0,480 \text{ N/m}$$

$$\alpha = 140^\circ$$

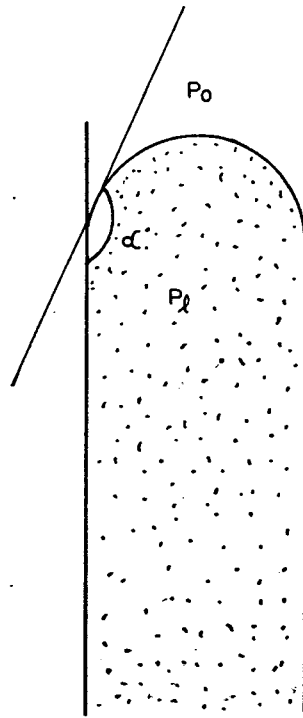


Fig.3.1 - Poro cilíndrico contendo mercúrio.

Para a consecução do método, uma pequena amostra do material poroso, previamente submetida a vácuo, é colocada em uma câmara contendo mercúrio e sujeita passo a passo a incrementos de pressão. Devido à evacuação, é assumido que $p_0 = 0$.

Um incremento de pressão Δp_{li} , indicado diretamente pelo porosímetro, produz uma injeção de mercúrio de volume ΔV_i na amostra, atribuído ao preenchimento de uma classe de poros cilíndricos com raio equivalente r_i , dado por:

$$r_i = - \frac{2 \sigma \cos \alpha}{P_{li}} \quad (3.2)$$

Como o volume ΔV_i é medido diretamente no porosímetro, pode-se através da Eq.3.2 obter a distribuição de volumes de poros em função de seus raios.

A superfície dos poros da classe em consideração, com a suposição de que sejam cilíndricos, será:

$$\Delta S_i = \frac{2 \Delta V_i}{r_i} \quad (3.3)$$

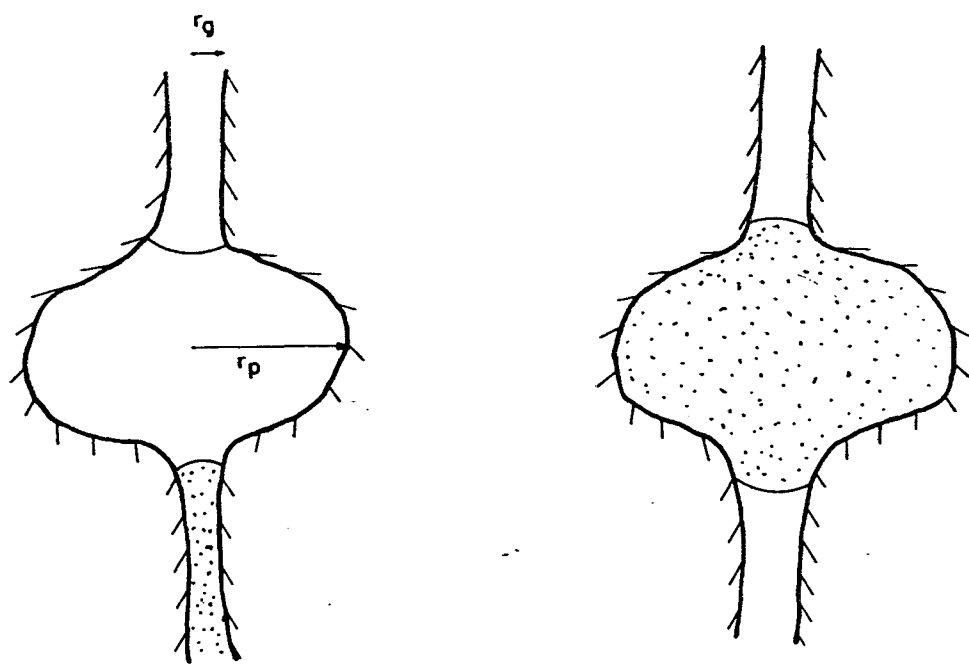
Assim, acumulando os ΔS_i , obtém-se a repartição de superfícies dos poros em função dos seus raios.

Na tabela 3.1 são mostradas as variáveis envolvidas no método, bem como a rotina de cálculo das grandezas de interesse.

Tabela 3.1 - Rotina de Cálculo para o Método de Porosimetria a Mercúrio.

GRANDEZAS MEDI DAS	PRESSÃO Hg VOLUME ACUMULADO	P_{li-1} V_{i-1}	$P_{li} = P_{li-1} + \Delta p_{li}$ $V_i = V_{i-1} + \Delta V_i$
GRANDEZAS CALCULADAS	RAIO PORO SUPERFÍCIE ACUMULADA	r_{i-1} S_{i-1}	$r_i = - 2\sigma \cos\alpha / p_{li}$ $S_i = S_{i-1} + \frac{2 \Delta V_i}{r_i}$

Considere-se agora uma formação de poros do tipo "com garganta", Fig.3.2, que é uma das causas principais do aparecimento de histerese nas isotermas de adsorção-dessorção, como visto na seção 2.1.5.



a) Injeção de Mercúrio b) Retirada de Mercúrio
Fig.3.2 - Formação de Poros "com garganta".

No método descrito, assume-se que os poros com mesmo raio vão sendo preenchidos independentemente da sua posição no meio poroso, quando este é submetido a incrementos de pressão. Inicialmente, para pressões baixas, são preenchidos os poros maiores e com pressões mais elevadas os poros menores, consecutivamente.

Contudo, em uma configuração como a apresentada na Fig.3.2, o poro de raio r_p se preencherá apenas a uma pressão correspondente ao raio r_g ($r_g < r_p$), ou seja, o preenchimento do poro de raio r_p é condicionado ao da garganta com raio r_g .

Dessa maneira, o volume de mercúrio penetrado será atribuído de maneira errônea ao poro de raio equivalente r_g . Portanto, a porosimetria com injeção de mercúrio sobreestima o volume dos poros menores em detrimento ao dos maiores. Deve-se notar, que se a máxima pressão posta em jogo for capaz de preencher todos os poros do material, a porosidade, seção 1.5, será corretamente determinada.

Ainda, haverá sobreestimação da superfície dos poros, devido a divisão na Eq.3.3 ser feita por um raio menor que o real.

Quando do alívio de pressão, para retirada do mercúrio, Fig.3.2.b, pode ocorrer uma descontinuidade da fase líquida com consequente aprisionamento de mercúrio no poro de raio r_p . O volume de mercúrio aprisionado, é um indicador qualitativo da frequência de ocorrência de formações de poros "com garganta".

3.1.2 - MODO OPERACIONAL

Para a investigação da estrutura porosa da argamassa de cal e cimento, utilizou-se o porosímetro Aminco-Winlow do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (Estado de São Paulo).

Com este porosímetro, consegue-se uma pressão máxima de 5.000 psi; a gama de raios de poros explorados variou de 240 Å até 1 μ m. Os poros com raios menores que 240 Å, inacessíveis a esse porosímetro, foram investigados com o uso da

isoterma experimental de adsorção e modelo B.J.H.

Foram realizados dois ensaios com pequenos fragmentos de amostra (obtidos quebrando-se uma das amostras cilíndricas) com massas secas de 0,58 g e 0,63 g.

As curvas de volume acumulado de poros em função de seus raios, para os dois ensaios, são mostradas na Fig.3.3, para que se possa observar a reprodutibilidade do método.

Adotou-se para descrição do espectro poroso o ensaio 2, ver Fig.3.3, visto ter-se utilizado uma pressão mais elevada neste ensaio.

Na Fig.3.4 apresenta-se a curva de superfícies acumulada de poros em função de seus raios obtida com o ensaio 2.

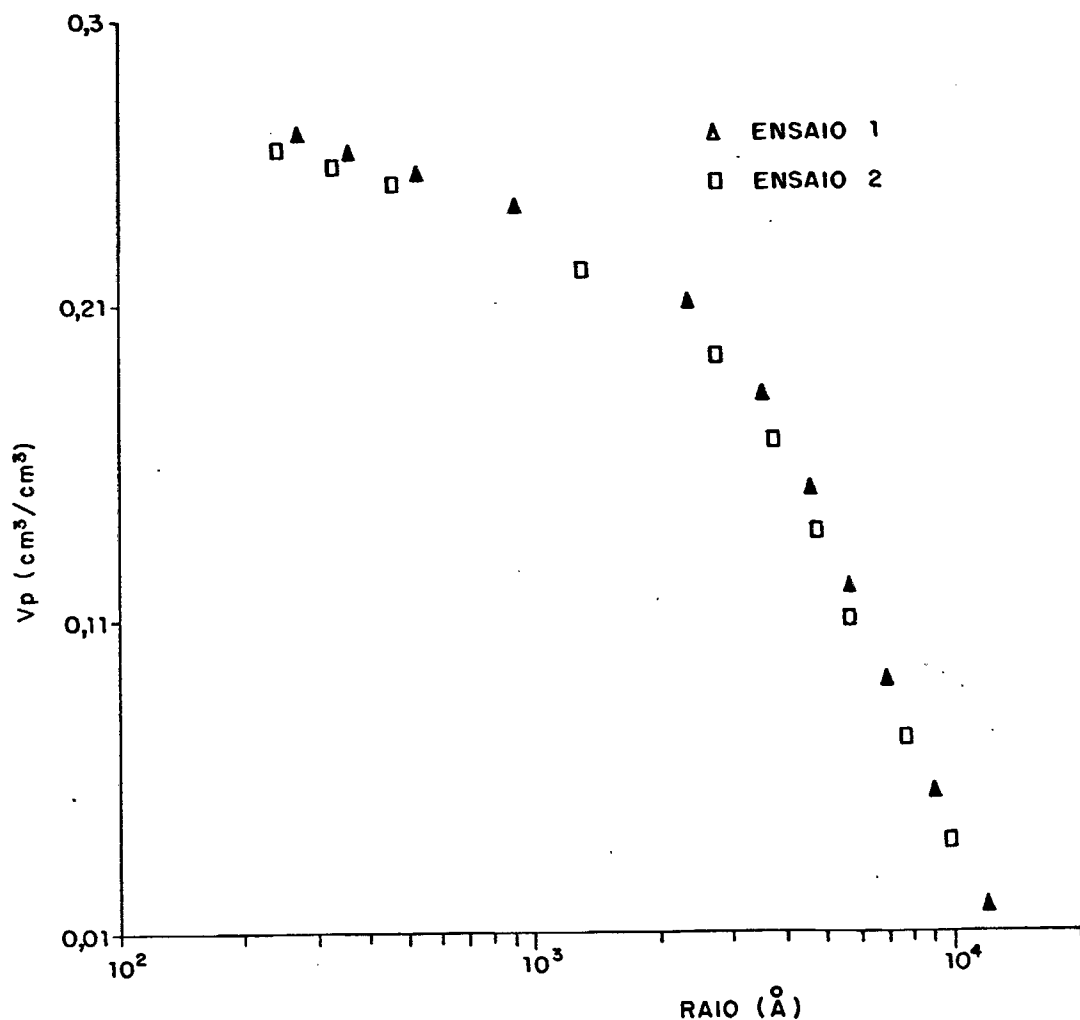


Fig.3.3 - Repartição de volumes de poros para os dois ensaios de porosimetria.

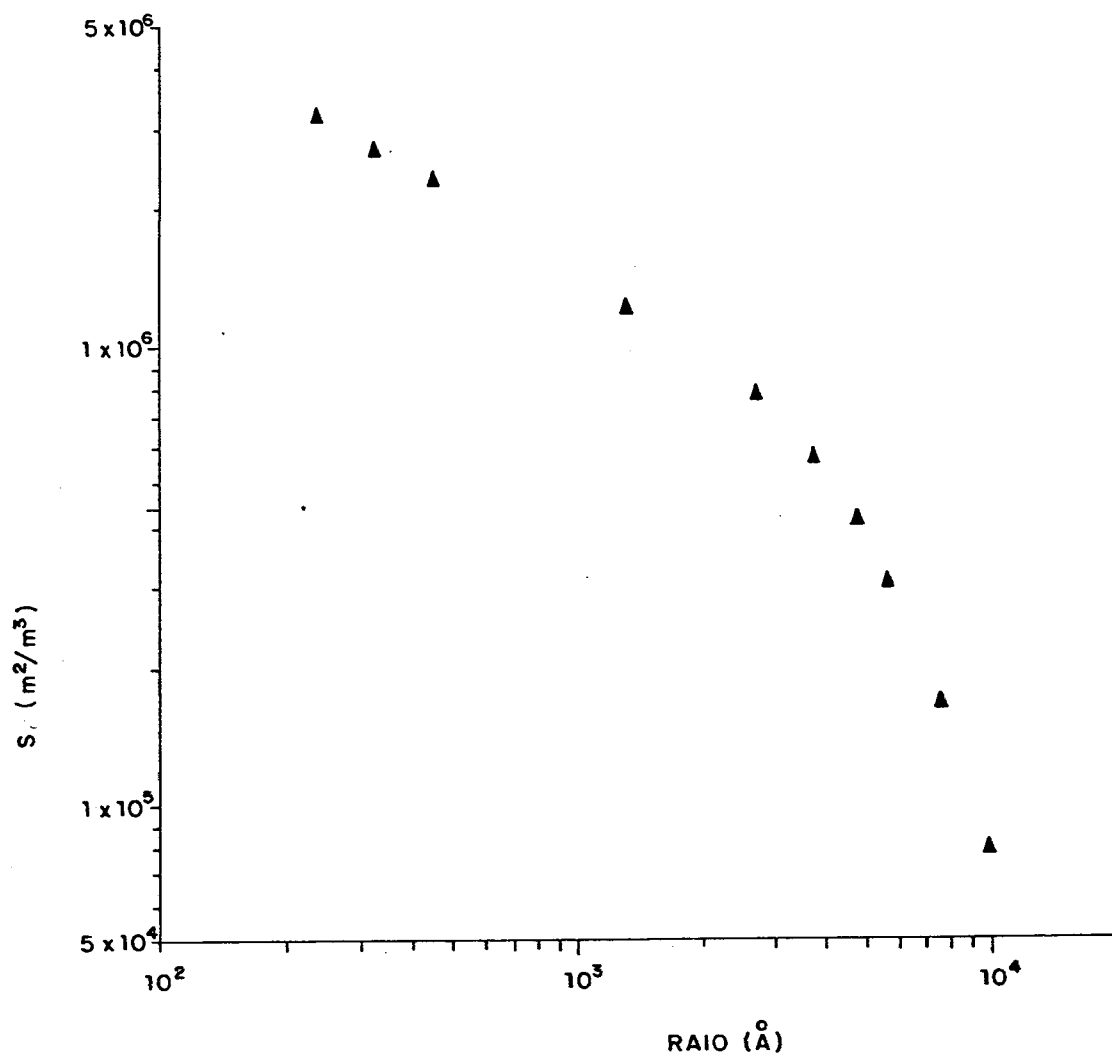


Fig.3.4 - Repartição de Superfícies de poros para o ensaio 2.

Ao final do teste, é interessante que se diminua gradualmente a pressão, para que se obtenha a curva de volume retirado de mercúrio dos poros em função de seus raios. Entretanto, com o porosímetro utilizado, essa diminuição gradual de pressão não foi possível, mas sim, um alívio direto até a pressão atmosférica. Procedendo-se dessa forma, observou-se que 25% do volume de mercúrio injetado ficou retido na amostra. Isto parece indicar uma pequena freqüência de ocorrência de formações de poros "com garganta" para a argamassa de cal e cimento. Esta afirmação é feita devido a comparação com outros materiais: a argamassa de revestimento analisada por Merouani [4], ver

páginas 7 e 25 de seu trabalho, retém 70% do mercúrio injetado; concreto celular marca comercial SICAL, ensaiado no porosímetro Aminco-Winlow pelo autor do presente trabalho, reteve 80% do volume de mercúrio injetado.

3.2 - MODELO B.J.H. PARA INVESTIGAÇÃO DO ESPECTRO POROSO COM RAIOS MENORES QUE 240 Å

O cálculo das superfícies acumuladas de poros é feito, escrevendo-se a Eq.2.25 na forma:

$$\Delta S_r = \frac{2}{r \cdot e_a} \left(\Delta \theta - S(r) \Delta e_a \right) \quad (3.4)$$

Para tanto, partindo-se de um valor inicial de $S(r)$, faz-se o acúmulo dos valores ΔS_r passo a passo.

Este acúmulo é feito para valores decrescentes de umidade relativa h , a partir de um ponto da isoterma experimental, de adsorção ou dessorção, bem próximo da saturação, caso isto seja possível, onde se assume $S(r) = 0$, o que significa volume de vazios nulo.

Decidiu-se utilizar a isoterma experimental de adsorção, para o cálculo da estrutura porosa, visto que a de dessorção apresenta histerese, o que não é levado em consideração no modelo B.J.H.

O maior valor de umidade relativa utilizado, 97%, dá um valor de conteúdo de equilíbrio na adsorção de 5,7% (em massa), que está longe da saturação (em torno de 18%), o que significa que não podemos admitir $S[r(h)] \Big|_{h=0,97} = 0$.

Para contornar esse problema, fez-se uma estimativa inicial para $S(r)$ utilizando dados obtidos com o ensaio de porosimetria com injeção de mercúrio.

Para o uso da Eq.3.4 como proposto, resta ainda a avaliação da espessura da camada adsorvida e_a em função da umidade relativa, e do raio r do poro, para cada valor de h , que delimita os poros menores, capazes de conter água capilar levando em conta a existência da camada adsorvida, dos poros

maiores, que contêm apenas água adsorvida.

A avaliação da espessura da camada adsorvida geralmente é feita utilizando fórmulas empíricas, como a de Halsey, ver [4] página 60:

$$e_a(h) = a [\log h]^{-b},$$

onde a e b são constantes características da natureza do adsorbato (em nosso caso água), do adsorvente (neste trabalho a argamassa) e da temperatura.

Devido não dispormos dos valores das constantes características para a argamassa e água, calculou-se a espessura e_a através da equação:

$$e_a(h) = N(h) \cdot e_m$$

onde:

e_m = espessura de uma camada monomolecular adsorvida;

$N(h)$ = número de camadas adsorvidas.

Com a suposição de que a água adsorvida possui a mesma densidade que a livre e que, a superfície projetada de uma molécula de água adsorvida A_{pm} seja igual a 10 (\AA)^2 , ver [4] página 60, tem-se:

$$e_m = \frac{M}{\left[\rho_l \right] \left[A_{pm} \right] \left[N^\circ \text{Avogadro} \right]} = 3 \text{ \AA}$$

O número de camadas adsorvidas foi calculado a partir da equação BET:

$$N = \frac{C h}{(1 - h) (1 - h + C h)},$$

com o valor de C obtido experimentalmente, seção 2.2.4.

Finalmente, para o cálculo do raio r limite, para cada valor de h , como mencionado anteriormente, utilizou-se a relação 2.19, reescrita como:

$$r = \frac{-2 \sigma M}{\rho_l R T \ln h} + e_a(h) \quad (3.5)$$

Devendo-se ter em mente que a equação anterior supõe uma geometria esférica para o menisco.

Nas Figuras 3.5 e 3.6 são mostrados os gráficos das funções distribuição e densidade de probabilidade de volumes de poros em função de seus raios, respectivamente. Na Fig.3.7 mostra-se a curva de repartição de superfícies acumuladas de poros.

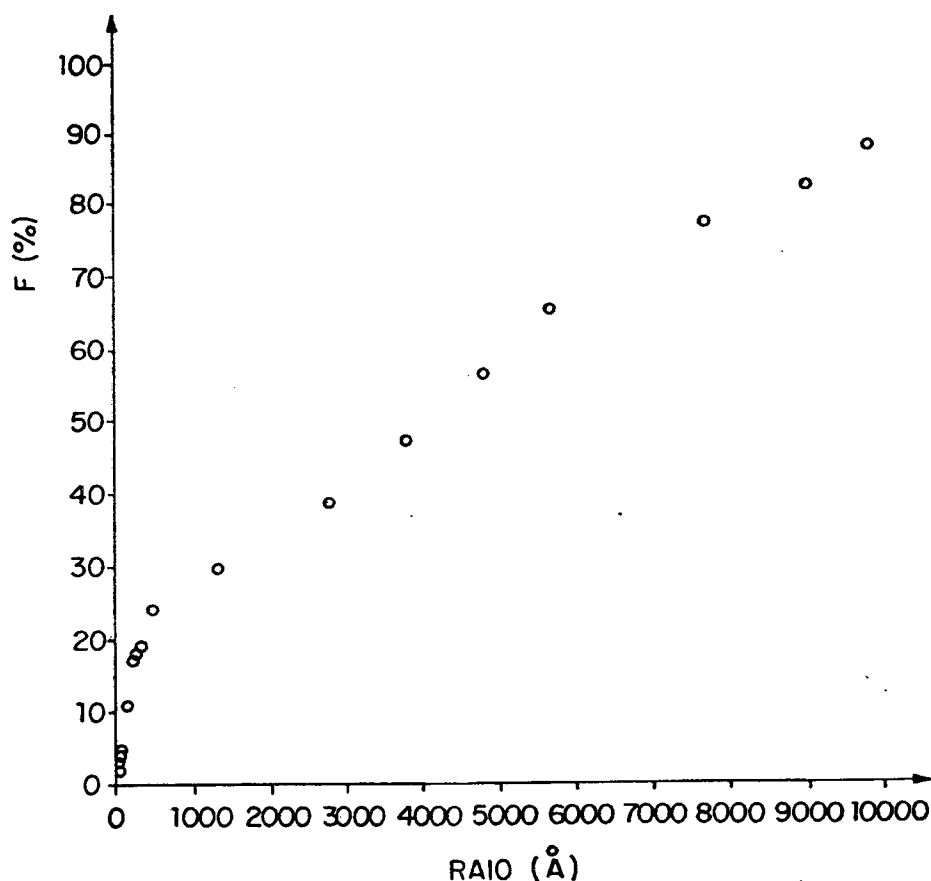


Fig.3.5 - Função distribuição de volumes de poros.

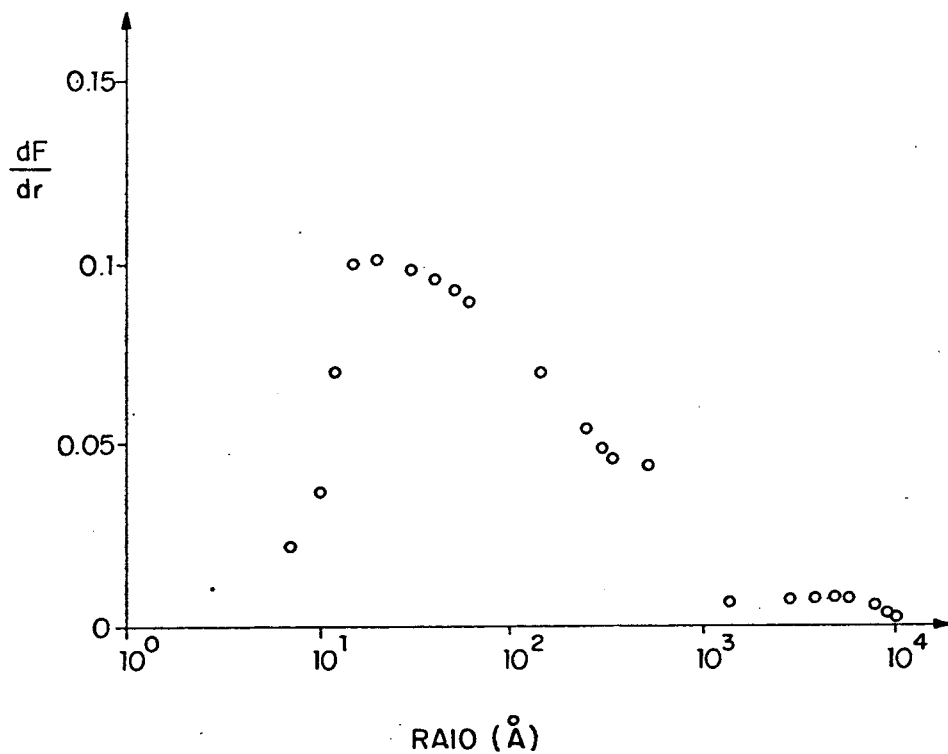


Fig. 3.6 - Função densidade de probabilidade para os volumes de poros.

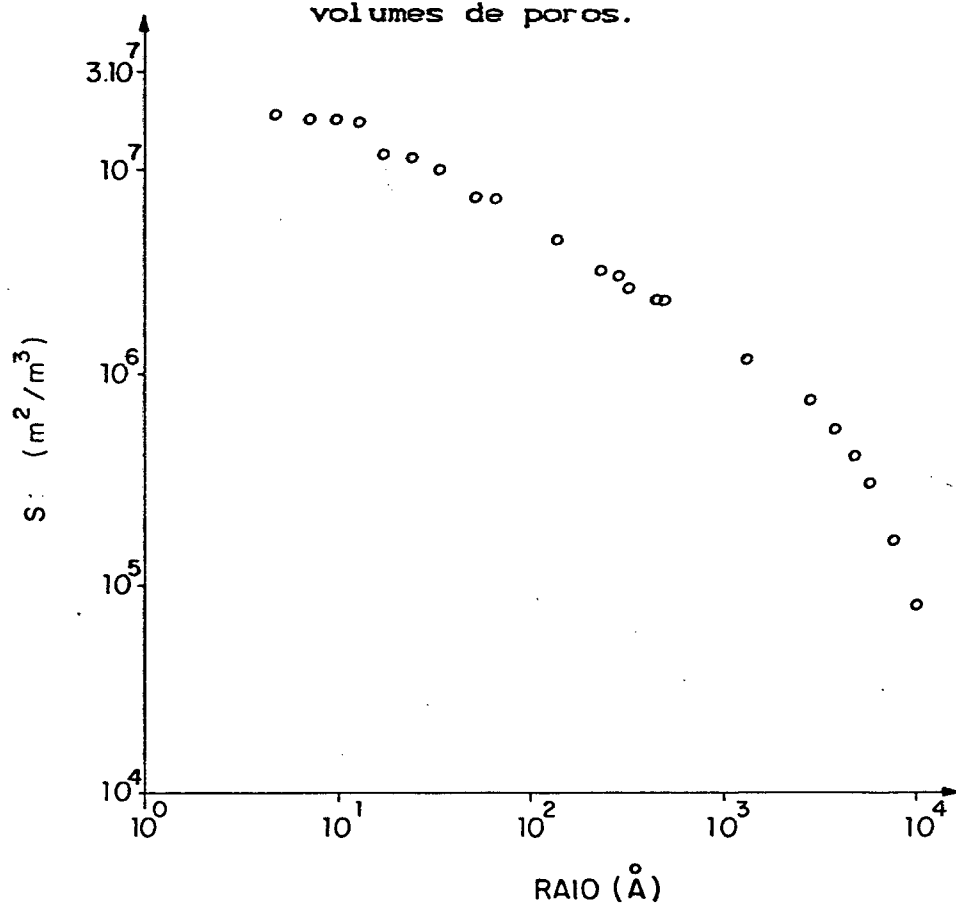


Fig. 3.7 - Repartição de superfícies de poros.

A função distribuição $F\%$ é obtida a partir da curva de volumes acumulados V_p , ver Fig. 3.3, através da relação:

$$F \% = \frac{n - V_p}{n} \times 100 \quad (3.6)$$

onde n é a porosidade.

A função densidade de probabilidade é obtida pela derivação da função distribuição, $\frac{dF}{dr}$. As derivadas foram avaliadas pelo método da diferenciação geométrica, Leduy e Zajic, apêndice B.

Para a construção dos gráficos das Figuras 3.5 e 3.7, utilizou-se os dados experimentais de porosimetria até o raio de poro igual a 240 Å e calculou-se a estrutura porosa para os raios menores através do modelo B.J.H. e a isoterma experimental de adsorção.

3.3 - OBTENÇÃO DA ISOTERMA DE ADSORÇÃO A PARTIR DA ESTRUTURA POROSA. SEPARAÇÃO DOS CONTEÚDOS ADSORVIDO E CAPILAR.

Como sugerido por Daian [3], podemos prever o comportamento da isoterma de adsorção a partir da estrutura porosa do material distinguindo os conteúdos adsorvido e capilar.

Para tanto, sejam $V(r)$ o volume dos poros de raio inferior a r , e $S(r)$ a superfície dos poros de raio superior a r , quantidades relativas à unidade de volume do material.

Para um dado valor de h , seja $r(h)$ o raio que delimita os poros menores, capazes de conter interface capilar, dos maiores, que contêm apenas água adsorvida.

Desprezando-se o efeito de curvatura, os poros maiores que $r(h)$ apresentarão um volume de líquido devido a camada adsorvida igual a $S[r(h)] \times e_o(h)$. O conteúdo total, será:

$$e = V[r(h)] + S[r(h)] \times e_o(h) \quad (3.7)$$

Portanto, o conhecimento de $V(r)$, $S(r)$ e $e_a(h)$ permite a previsão da isoterma de adsorção (a histerese não é considerada), separando os conteúdos capilar e adsorvido.

Na Fig.3.8 pode ser observado as quantidades adsorvida e capilar, em função da umidade relativa, separadamente.

Na Fig.3.9 é feita uma comparação entre a isoterma experimental de adsorção a 25°C, e aquela obtida a partir da estrutura porosa através da Eq.3.7.

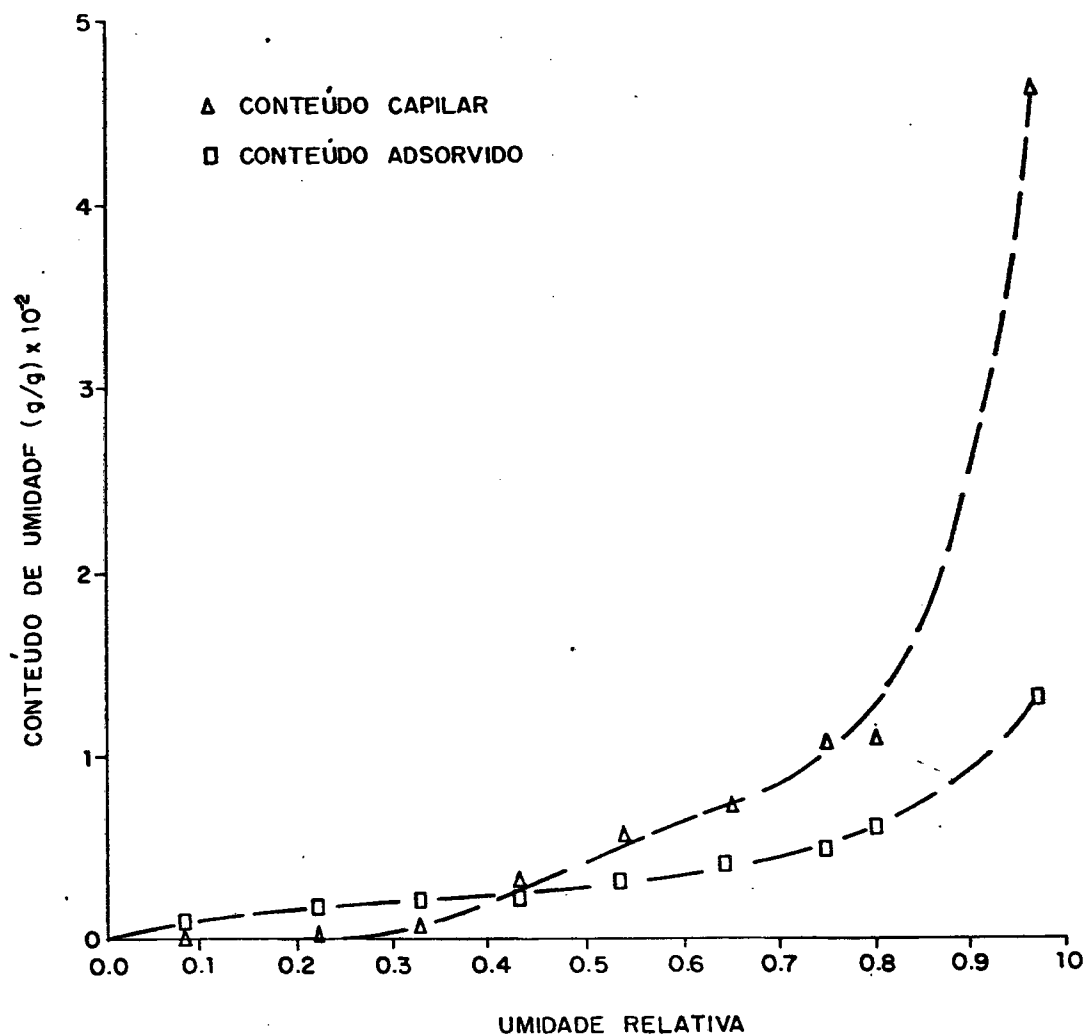


Fig.3.8 - Separação dos conteúdos adsorvido e capilar.

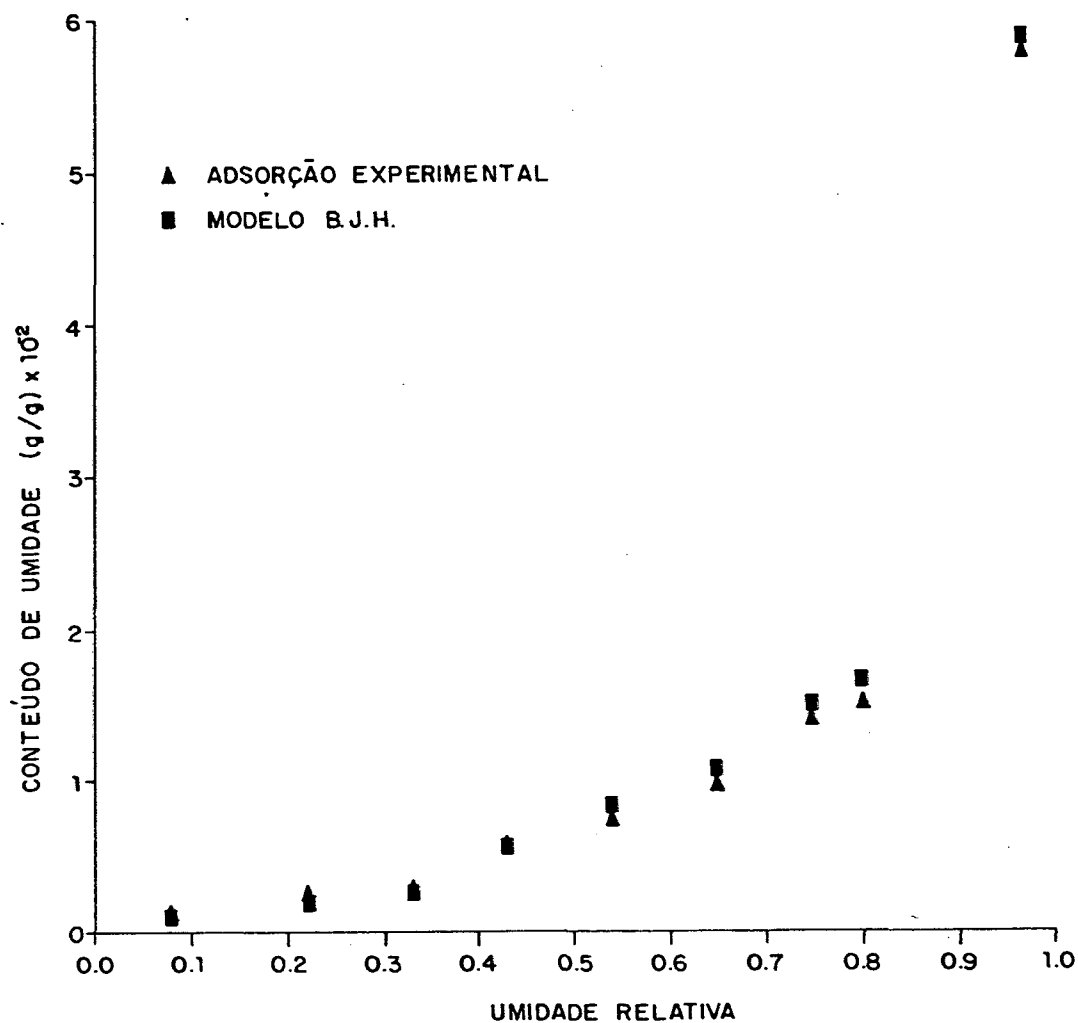


Fig.3.9 - Comparação entre a isoterma experimental de adsorção e a obtida através do modelo B.J.H. a partir da estrutura porosa do material.

3.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Podemos observar da função densidade de probabilidades de volumes de poros, Fig.3.6, que a argamassa apresenta uma gama de raios de poros bastante variada, com proporções de volume poroso apreciáveis, contendo mesoporos e macroporos. Notamos ainda da função densidade, uma alta concentração de poros com raios entre 10 Å e 100 Å. Apesar da sobreestimação do volume dos poros menores em detrimento aos maiores, inerente ao método de investigação adotado, essa dimensão (10 - 100 Å) é atribuída como sendo característica dos poros que compõem a pasta de ligantes (que agrega os grãos de areia).

A porosidade total encontrada foi de $0,32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, próxima ao valor encontrado com o método de saturação com água, seção 1.5 ($0,31 \pm 0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Estes valores, embora sejam da mesma ordem de grandeza, são de difícil comparação, devido as considerações:

- A porosimetria com injeção de mercúrio não computou o volume dos poros com raio superior a $1 \mu\text{m}$;
- No uso do modelo B.J.H., os passos Δh de umidade relativa são grandes, o que ocasiona sobreestimação nos acúmulos de volumes de poros;
- A saturação com água, seção 1.5, não é completa, pois não se conseguiu vácuo absoluto.

A superfície específica total, Fig.3.7, apresentou o valor de $2,0 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

A título de comparação, a superfície específica total foi também calculada a partir do conteúdo de água monomolecular W_m , obtido através dos ajustes matemáticos com os modelos GAB e BET sobre a isoterma experimental de adsorção.

O cálculo foi feito através da equação:

$$S_{\text{total}} = \rho_s \cdot A_{\text{pm}} \cdot \frac{W_m}{M} \cdot (n^\circ \text{ de Avogrado}),$$

onde novamente se assumiu $A_{\text{pm}} = 10 (\text{Å})^2$

Para o ajuste com o modelo GAB, encontrou-se o valor de W_m igual a $3,8 \times 10^{-3}$, o que fornece $S_{total} = 2,2 \times 10^{+5} \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

Utilizando o valor para W_m de $4,8 \times 10^{-3}$, que foi o obtido com o ajuste matemático através do modelo BET, obtém-se $S_{total} = 2,8 \times 10^{+5} \text{ cm}^2/\text{cm}^3$.

Os valores de superfície específica total obtidos para a argamassa, apresentam razoável concordância, haja visto o uso de métodos bastante diferentes para as suas determinações.

Aqueles obtidos através da adsorção de água, se mostram levemente superiores - devido provavelmente a capacidade de adsorção de água em poros muito pequenos - ainda que a porosimetria e o uso do modelo B.J.H. sobreestime os valores de superfície dos poros.

Para a grande concentração de volume poroso entre 10 Å e 100 Å, aventamos a hipótese de a água adsorvida predominar sobre a condensação capilar: a interação entre as moléculas de água e a matriz sólida é muito superior às forças de interação entre as moléculas, não havendo mobilidade no sentido de se constituir uma fase líquida.

Podemos observar da Fig.2.15 uma fraca histerese até em torno de 50% de umidade relativa, devido possivelmente ao pequeno volume de água condensada capilarmente.

A condensação capilar começa para um valor de umidade relativa em torno de 33%, Fig.3.8, e a partir desse ponto começa a ocorrer um sensível crescimento no conteúdo de umidade, devido ao volume formado pelas ilhas de líquido.

A presença de poros com dimensões tais que permitam a condensação capilar a partir de valores médios de umidade relativa, implicando em um aumento sensível do conteúdo de umidade, confere à argamassa uma grande capacidade de retenção de água.

CAPÍTULO 4

4 - MEDICAÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE EM MATERIAIS POROSOS CONSOLIDADOS

No capítulo seguinte, se propõe realizar um estudo experimental de migração de umidade, em condições isotérmicas, utilizando a técnica de infiltração horizontal de água em colunas de argamassa, como sugerido por Bruce e Klute [16] e também utilizada por Quadri [17], em seus estudos com materiais arenosos.

Todavia, para a consecução deste estudo, torna-se necessário o domínio de um método de medição de conteúdo de umidade, que possa ser utilizado em meios porosos consolidados.

Este capítulo se dedica à apresentação dos principais métodos existentes, com ênfase ao que será utilizado nesse trabalho: medição do conteúdo de umidade, valendo-se da sua influência sobre a condutividade térmica aparente dos materiais.

4.1 - MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Este é um método bastante simples, necessitando para a sua execução, a medição das massas úmida e seca da amostra.

Neste trabalho, ele foi utilizado, p.ex., para a determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio, nos experimentos de adsorção e dessorção. Será ainda utilizado quando da obtenção da curva padrão de condutividade térmica aparente em função do conteúdo, seção 4.4.6.

No entanto, no experimento de infiltração de água, que será apresentado no capítulo seguinte, é necessário o conhecimento do perfil de conteúdo na coluna, e para tanto, ela deve ser seccionada em pequenas "bolachas", caso se utilize o método gravimétrico.

Isto é desaconselhável em colunas de materiais consolidados, dado que durante o processo de seccionamento haverá evaporação de água devido à "geração" de calor por atrito.

Todavia, o método gravimétrico é bastante utilizado em experimentações com solos, onde não ocorre o inconveniente

citado acima.

4.2 - MEDIÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE POR MÉTODOS ELÉTRICOS

Estes métodos utilizam a relação de dependência que existe entre o conteúdo de umidade e a resistência elétrica, ou a impedância, de um meio poroso.

No entanto, além da dependência com o conteúdo de umidade, a resistência é função da concentração de íons do meio poroso, que pode sofrer variações no tempo, Perrin [2]. A influência da concentração de íons é negligenciada quando a variável de dependência medida é a constante dielétrica [2].

4.3 - MEDIÇÃO DO CONTEÚDO PELO MÉTODO DE ATENUAÇÃO DE RAIOS-GAMA

Esta técnica é, provavelmente, a mais utilizada dentre as existentes para medição do conteúdo de umidade em materiais porosos consolidados. Vários pesquisadores têm utilizado a técnica de atenuação de raios-gama: Reichardt [18] e Vachaud [19] em trabalhos com solos; Appoloni et al [20] em trabalhos com solos e materiais de construção civil; Daian [3] e Merouani [4] em materiais de construção civil.

O princípio desta técnica consiste em medir a atenuação da intensidade de um feixe de raios-gama - a qual está relacionada com o conteúdo de umidade - que atravessa o material. Para a execução desta técnica é necessário uma aparelhagem relativamente sofisticada [4]:

- Uma fonte radioativa;
- Um conjunto de colimação;
- Um detector-amplificador com a função de converter a energia dos fótons recebidos em um sinal elétrico;
- Um dispositivo de contagem acoplado a um relógio, permitindo adicionar os impulsos recebidos, pendente a um tempo pré selecionado.

Segundo Merouani [4], a incerteza de medição do conteúdo de umidade é menor quando:

- A intensidade do feixe atenuado na amostra propriamente dita é mais elevada;

- A duração do tempo de contagem é maior.

Abaixo, são apresentados os erros $\Delta\theta$ na medição de conteúdo de umidade para vários tempos de contagem, em amostras da argamassa de revestimento e da argamassa de cimento com espessura de 3 cm, como avaliados por Merouani [4]:

Tabela 4.1 - Avaliação dos erros $\Delta\theta$ em função do tempo de contagem (Merouani [4]).

TEMPO CONTAGEM (s)	$\Delta\theta$ (cm ³ /cm ³)	
	ARGAMASSA DE REVESTIMENTO	ARGAMASSA DE CIMENTO
500	0,0085	0,012
1000	0,006	0,008
2000	0,004	0,006

Deve ser notado também, que dada a pequena seção transversal do raio de incidência, não-homogeneidades locais no material serão fontes de dispersão das medições.

Além disso, a técnica de atenuação com raios-gama não é adequada para baixos conteúdos de umidade.

4.4 - MEDIÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE ATRAVÉS DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MEIOS POROSOS

Este método utiliza a dependência de parâmetros físicos térmicos (condutividade térmica, difusividade térmica ou calor específico) com o conteúdo de umidade. Neste trabalho, será obtida experimentalmente uma curva padrão de condutividade térmica aparente - um parâmetro que leva em conta a condução de calor de Fourier e os efeitos de calor latente devido à migração de vapor - em função do conteúdo.

A medição de condutividade é feita através da técnica da sonda térmica, que será exposta a seguir.

4.4.1 - PRINCÍPIOS DO MÉTODO DA SONDA TÉRMICA

A sonda térmica, esquematizada na Fig.4.1, é um elemento filiforme que é colocada no meio que se deseje medir a condutividade térmica.

Calor é dissipado na resistência elétrica que percorre internamente o corpo da sonda, e mede-se a evolução de temperatura com o tempo através do termopar.

A condutividade térmica do meio é determinada através do modelo matemático que a relaciona com a evolução de temperatura na sonda.

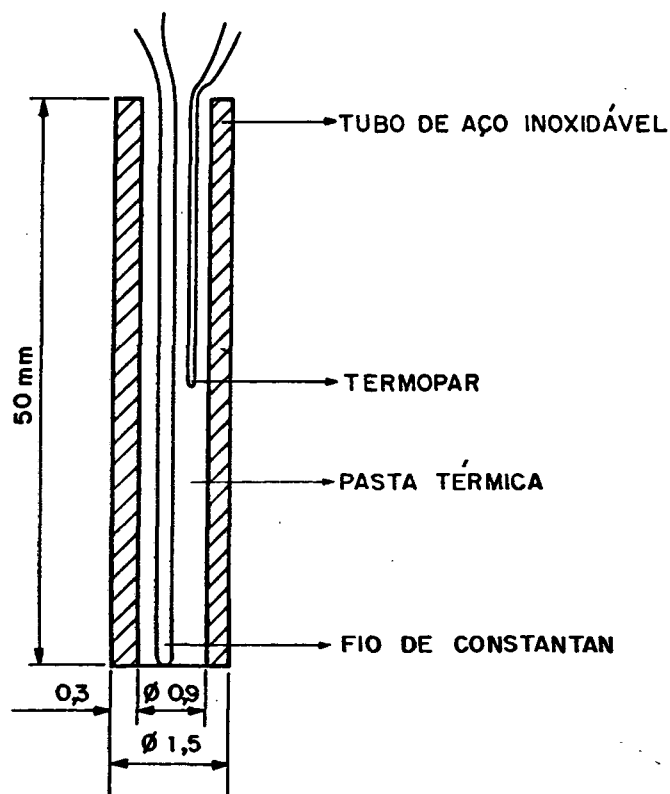


Fig.4.1 - A sonda térmica.

4.4.2 - DETALHES CONSTRUTIVOS DA SONDA TÉRMICA

O corpo da sonda é feito com um tubo de aço inoxidável com as dimensões indicadas na Fig.4.1. É importante o uso de um material resistente à corrosão pois a sonda irá atuar em meios úmidos.

A dissipação de calor é feita através de um fio de

constantan de 0,15 mm de diâmetro, isolado eletricamente (com uma resina do tipo usada no isolamento de fios de cobre para transformadores elétricos).

O constantan apresenta um baixo coeficiente de variação da resistividade elétrica com a temperatura; isto é necessário, pois o modelo matemático para a evolução de temperatura na sonda, que será apresentado a seguir, supõe taxa de dissipação de calor constante.

O termopar utilizado é de chromel-constantan com isolamento de teflon, com diâmetro de 0,20 mm (externo do isolamento).

A junção quente do termopar (posicionada no centro da sonda) também é isolada eletricamente com resina. Os espaços vazios existentes no interior do corpo da sonda, após a colocação do fio de constantan e do termopar, são preenchidos com uma pasta de alta condutividade térmica, com a finalidade de evitar a convecção do ar e atenuar as resistências térmicas de contacto.

Após a colocação da pasta térmica, estica-se o fio de constantan, posiciona-se o termopar no centro da sonda, e tampa-se o seu fundo com resina epóxi.

Uma fotografia das sondas térmicas é mostrada na Fig.4.2.

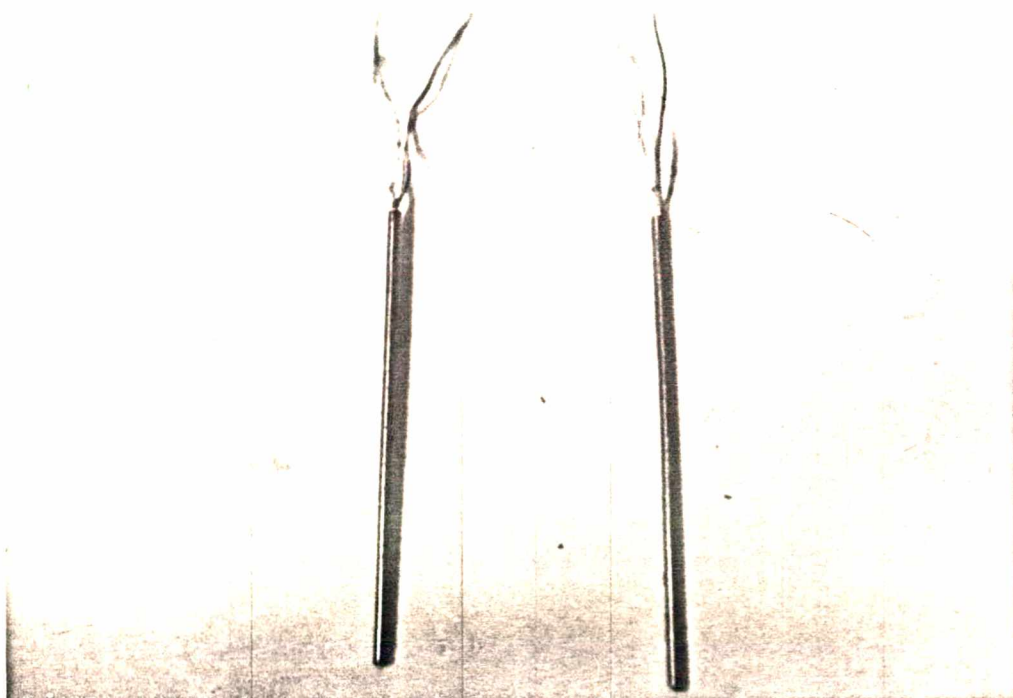


Fig.4.2 - Fotografia das sondas térmicas.

4.4.3 - CÁLCULO TEÓRICO DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA COM O TEMPO NA SONDA TÉRMICA

Na Fig.4.3 mostra-se a maneira de inserção da sonda nas amostras. É feito um furo de aproximadamente 3 mm de diâmetro e o espaço vazio é preenchido com mercúrio para evitar a convecção do ar e atenuar a resistência térmica de contacto sonda-material.

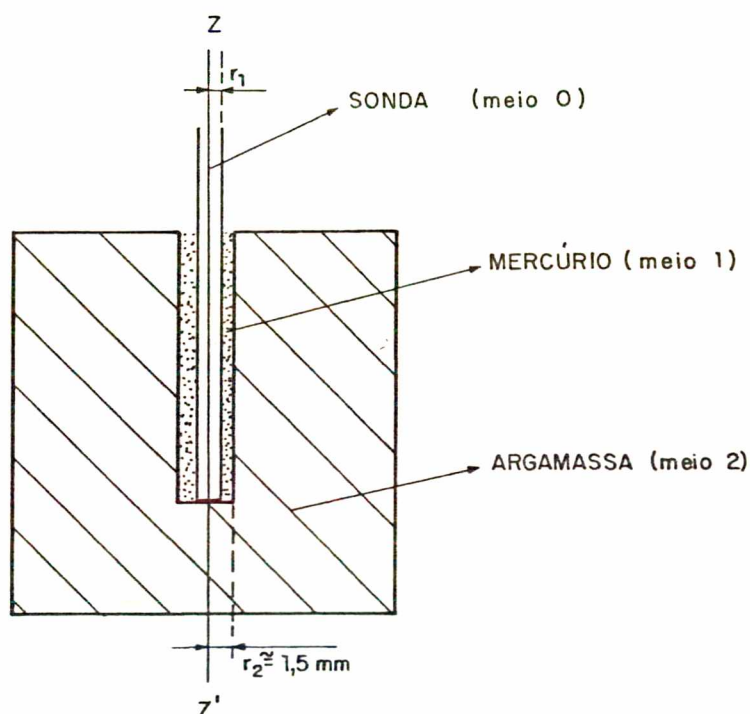


Fig.4.3 - Modo de inserção da sonda nas amostras.

A resolução da equação da condução de calor para o sistema da Fig.4.3 é devida a Perrin [2], que adotou as seguintes hipóteses:

- Taxa de dissipação de calor constante e uniforme na sonda;
- Temperatura da sonda uniforme;
- Fluxo de calor radial e apenas por condução;
- Para $t = 0$, todo o sistema (meios 0, 1 e 2) está a mesma temperatura;
- Meio infinito.

A hipótese de fluxo de calor radial é assumida devido a razão comprimento da sonda pelo seu diâmetro ser grande.

Segundo Blackwell [22], quando essa razão é igual ou superior a 30, não há fluxo de calor axial apreciável.

A solução encontrada por Perrin, ver apêndice C, é:

$$\begin{aligned}
 T_s(t) = & \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \left\{ \left[\ln \frac{4a_2^2 t}{r_2^2} - \gamma + \frac{2\lambda_2}{r_2 H} \right] - \right. \\
 & - \frac{1}{t} \left[\frac{r_2^2 - r_1^2}{a_1} + \lambda_1 \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2 H a_1} + \frac{2 M_o C_o}{\pi r_2 H} - \right. \\
 & - \left. \frac{\lambda_2 r_2}{H a_1} - \frac{r_2^2}{4a_1} \ln \frac{r_2^2}{r_1^2} \right] + \frac{1}{t} \left[\ln \frac{4a_2^2 t}{r_2^2} - \gamma \right] \times \\
 & \times \left. \left[\frac{\lambda_1 (r_1^2 - r_2^2)}{2 \lambda_2 a_1} - \frac{M_o C_o}{2\pi\lambda_2} \right] \right\} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Válida para $t \gg \frac{r_2^2}{a_2}$ onde:

$T_s(t)$ = temperatura uniforme da sonda em função do tempo;

Q = potência emitida por unidade de comprimento da sonda;

r_1 = raio da sonda;

r_2 = raio do furo na argamassa;

λ_1, a_1 = condutividade e difusividade térmica do meio 1, o mercúrio;

λ_2, a_2 = condutividade e difusividade térmica do meio 2, a argamassa;

M_o = massa da sonda por unidade de comprimento;

C_o = calor específico da sonda;

H = coeficiente de troca de calor superficial entre os meios 1 e 2;

$\gamma = 0,5772$, a constante de Euler.

4.4.4 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

O arranjo experimental utilizado na determinação da condutividade térmica é mostrado na Fig.4.4.

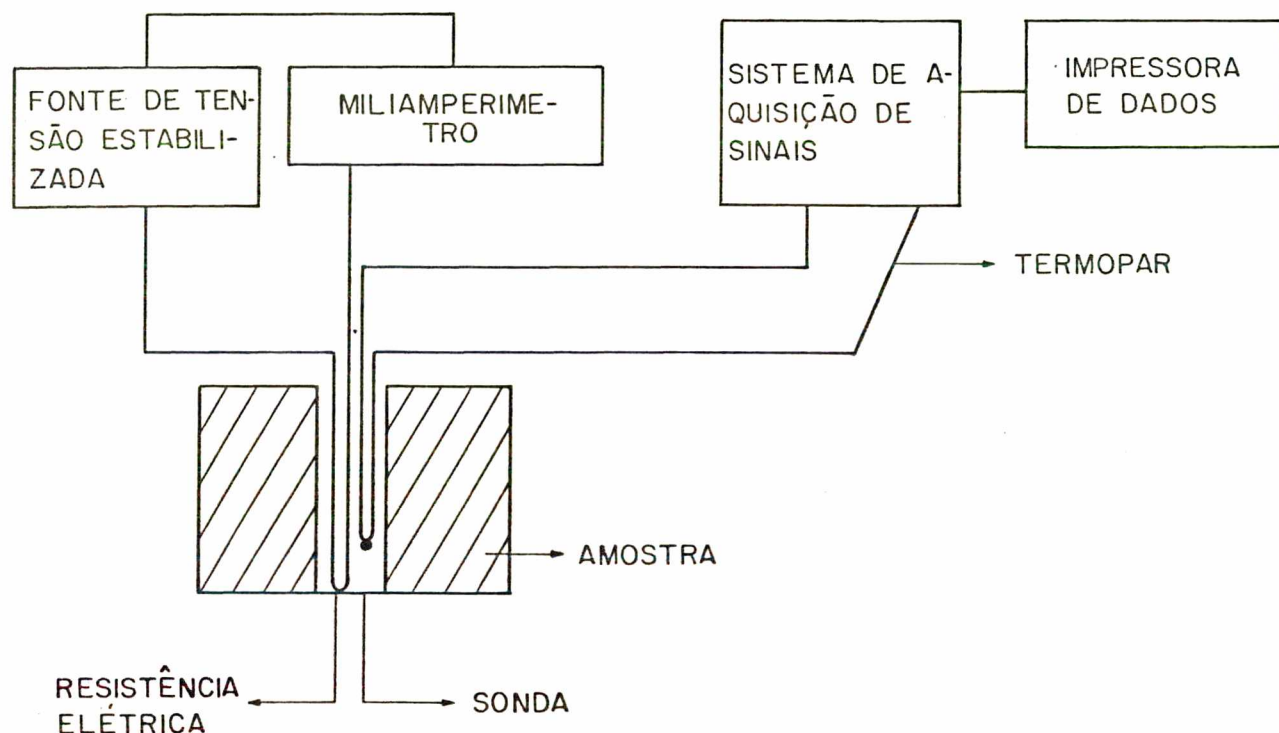


Fig.4.4 - Arranjo experimental para medição da condutividade térmica.

Uma curva experimental típica de evolução de temperatura na sonda em função do tempo é mostrada na Fig.4.5.

Pode-se escrever a Eq.(4.1) na forma:

$$T_s(t) = A_1 \ln t + A_2 + \frac{A_3}{t} (\ln t + A_4) \quad (4.2)$$

onde:

$$A_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} ; A_2 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \left[\ln \frac{4a_2^2}{r_2^2} - \gamma + \frac{2\lambda_2}{r_2 H} \right] ;$$

$$A_3 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} \left(\frac{\lambda_1 \left(r_1^2 - r_2^2 \right)^2}{2\lambda_2 a_1} - \frac{M_o C_o}{2\pi\lambda_2} \right) ;$$

$$A_4 = \frac{4a_2}{r_2^2} - \gamma +$$

$$+ \left[\frac{\lambda_2 r_2}{Ha_1} + \frac{r_2^2}{4a_1} \ln \frac{r_2^2}{r_1^2} - \frac{2M_o C_o}{\pi r_2 H} - \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{a_1} - \frac{\lambda_1 (r_2^2 - r_1^2)}{r_2 Ha_1} \right] \\ \left[\frac{\lambda_1 (r_1^2 - r_2^2)}{2\lambda_2 a_1} - \frac{M_o C_o}{2\pi\lambda_2} \right]$$

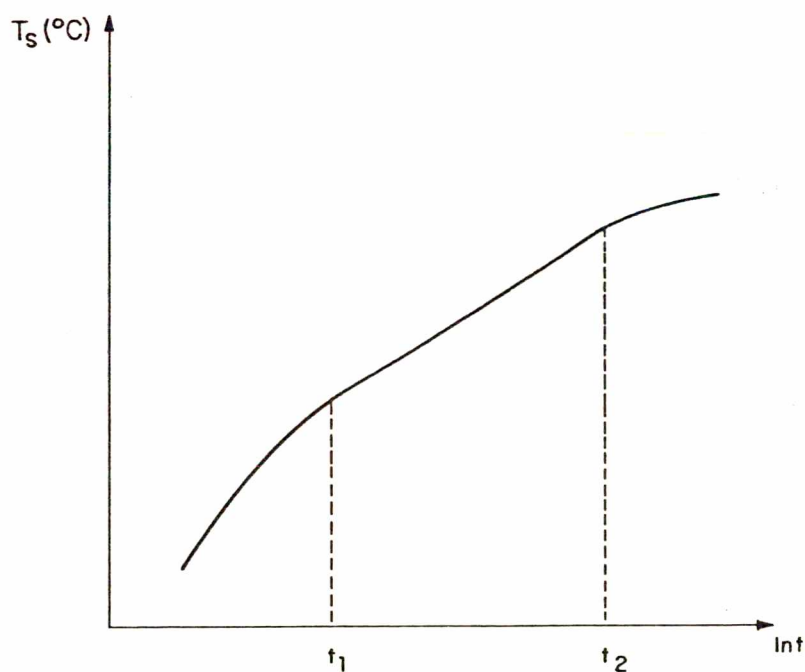


Fig.4.5 - Curva típica de evolução de temperatura na sonda.

A resistência térmica de contacto sonda-meio e a capacidade térmica da sonda estão representadas no terceiro termo do lado direito da Eq.4.2, proporcional a t^{-1} .

Após um intervalo de tempo suficientemente longo a contribuição desse termo desaparece e a Eq.4.2 toma a forma linear:

$$T_0(t) = A_1 \ln t + A_2 \quad (4.3)$$

Isto pode ser visto na Fig.4.5, onde a parte linear está compreendida entre os instantes t_1 e t_2 .

Ora, a inclinação da reta entre os instantes t_1 e t_2 é dada por $Q/4\pi\lambda_2$ e, a partir dessa relação, calcula-se a condutividade térmica.

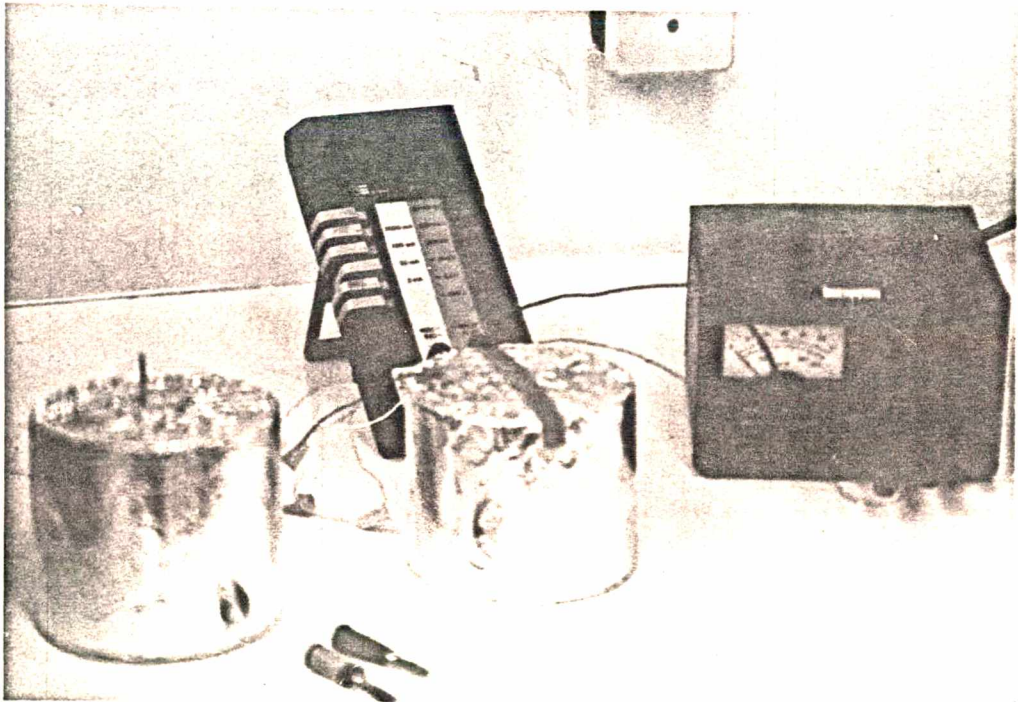
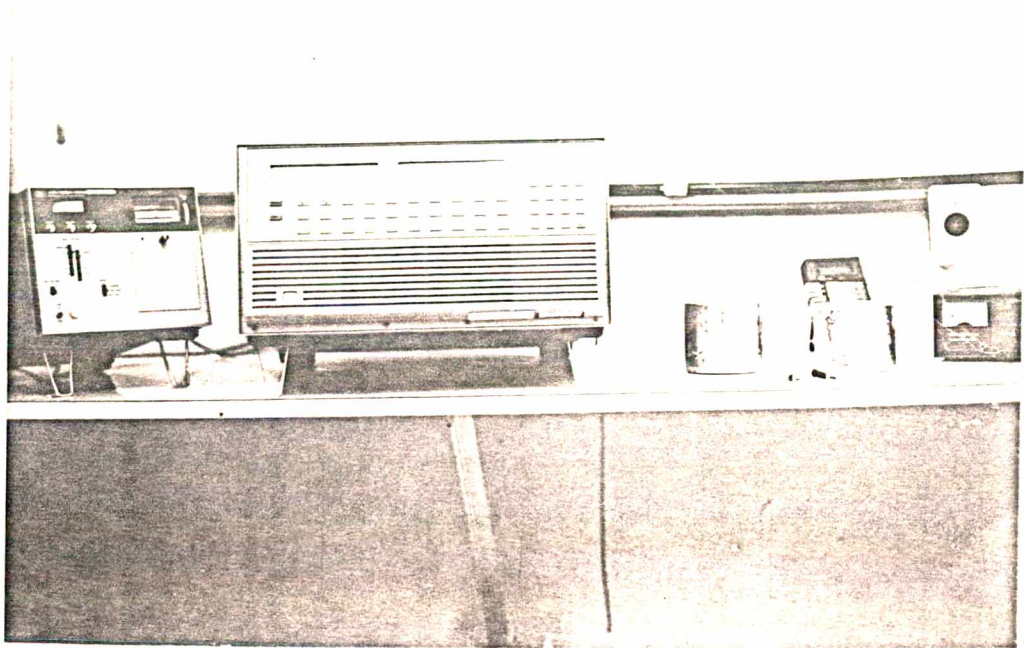
Para $t < t_1$, a evolução de temperatura é condicionada pela capacidade térmica da sonda e pela resistência de contacto térmica sonda-meio associados aos parâmetros A_3 e A_4 da Eq.4.2; para $t > t_2$, as condições de contorno da amostra modificam a evolução de temperatura (efeito de borda).

Para se obter resultados experimentais com baixa incerteza de medição é importante:

- evitar a convecção do ar (no interior da sonda, entre a sonda e o material bem como nos poros do material);
- utilizar amostras de volume suficientemente grande (para retardar o efeito de borda);
- atenuar resistências de contacto.

Isto é essencial para assegurar que a faixa de medição de interesse - a parte linear da curva de evolução de temperatura, entre os instantes t_1 e t_2 - seja suficientemente extensa.

Na Fig.4.6, mostra-se algumas fotografias do aparato experimental utilizado na medição de condutividade térmica.



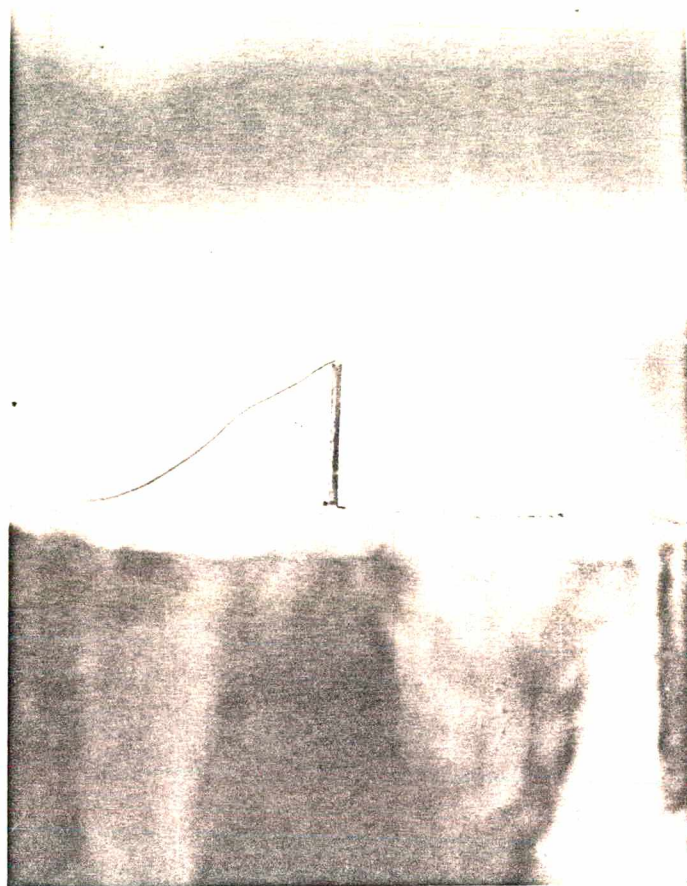


Fig.4.6 - Fotografias do aparato experimental utilizado na medição da condutividade térmica.

4.4.5 - AVALIAÇÃO TEÓRICA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Como foi dito na seção anterior, a condutividade térmica é calculada a partir da inclinação da curva experimental de evolução de temperatura.

A inclinação foi calculada por regressão linear através da relação:

$$\frac{Q}{4\pi\lambda} = \frac{N \sum \ln t \cdot T - \sum \ln t \cdot \sum T}{N \sum (\ln t)^2 - \left[\sum \ln t \right]^2} \quad (4.4)$$

onde:

N = número de pontos experimentais.

A linearidade da curva experimental é muito boa, de maneira que o valor da inclinação calculado, usando apenas os dois pontos experimentais extremos - (t_1, T_1) , (t_2, T_2) - é muito próximo daquele avaliado por regressão linear, Eq.(4.4).

Assim, para a avaliação do erro na medição de condutividade térmica, utilizaremos a relação:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \left[\frac{t_2}{t_1} \right] \quad (4.5)$$

Utilizando $(T_2 - T_1)$ como variável dependente, escrevemos a relação funcional:

$$T_2 - T_1 = f \left(Q, \lambda, t_2/t_1 \right) \quad (4.6)$$

Então, a variação $\Delta(T_2 - T_1)$, será dada por:

$$\Delta(T_2 - T_1) = \Delta Q \frac{\partial f}{\partial Q} + \Delta\lambda \frac{\partial f}{\partial \lambda} + \Delta \left[\frac{t_2}{t_1} \right] \frac{\partial f}{\partial \left[\frac{t_2}{t_1} \right]} \quad (4.7)$$

ou,

$$\frac{\Delta(T_2 - T_1)}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta Q}{Q} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\frac{\Delta t_2}{t_2} - \frac{\Delta t_1}{t_1}}{\ln \left[\frac{t_2}{t_1} \right]} \quad (4.8)$$

A potência Q, dissipada pelo fio de constantan, por unidade de comprimento da sonda, é calculada através de:

$$Q = \frac{(R_m) (2l) (i^2)}{1} = 2 R_m i^2 \quad (4.9)$$

onde:

R_m = valor da resistência por unidade de comprimento, no caso do fio de constantan utilizado, $100 \frac{\Omega}{m}$;

l = comprimento da sonda;

i = intensidade de corrente elétrica que percorre o fio.

A variação ΔQ será então:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta R_m}{R_m} + 2 \frac{\Delta i}{i} \quad (4.10)$$

Substituindo a Eq.4.10 na Eq.4.8, vem a expressão para o cálculo do erro $\Delta \lambda$, sobre a condutividade térmica:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = & \left| \frac{\Delta R_m}{R_m} \right| + 2 \left| \frac{\Delta i}{i} \right| + \left| \frac{\Delta T_2}{T_2 - T_1} \right| + \left| \frac{\Delta T_1}{T_2 - T_1} \right| + \\ & + \left| \frac{\Delta t_2 / t_2}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \right| + \left| \frac{\Delta t_1 / t_1}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \right| \end{aligned} \quad (4.11)$$

Na Eq.4.11, adicionou-se os valores em módulo das várias parcelas de erro, tendo-se assim, uma incerteza $\Delta \lambda$ máxima.

As componentes de erros aleatórios e sistemáticos de cada termo do lado direito da Eq.4.11 foram assim avaliadas:

$$\left(\frac{\Delta R_m}{R_m} \right)_{\text{aleatório}} = 0, \quad \left(\frac{\Delta R_m}{R_m} \right)_{\text{sistemático}} = \frac{0,5 \Omega/m}{100 \Omega/m} = 0,5\%$$

$$\left(\frac{\Delta i}{i} \right)_{\text{aleatório}} = \left(\frac{\Delta i}{i} \right)_{\text{sistemático}} = \frac{0,5 \text{ mA}}{150 \text{ mA}} = 0,3\%$$

$$\left(\Delta T_1\right)_{\text{aleatório}} = \left(\Delta T_2\right)_{\text{aleatório}} = 0,05^{\circ}\text{C} ;$$

$$\left(\Delta T_1\right)_{\text{sistemático}} = \left(\Delta T_2\right)_{\text{sistemático}} = 0,05^{\circ}\text{C} ;$$

Estas avaliações de ΔT_1 e ΔT_2 são oriundas do comportamento metrológico do tipo de termopar utilizado, obtido pelo autor deste trabalho no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Santa Catarina.

$$T_2 - T_1 \cong 3^{\circ}\text{C} \text{ daí,}$$

$$\left[\frac{\Delta T_1}{T_2 - T_1}\right]_{\text{aleatório}} = \left[\frac{\Delta T_2}{T_2 - T_1}\right]_{\text{aleatório}} = 1,67\% , \text{ e}$$

$$\left[\frac{\Delta T_1}{T_2 - T_1}\right]_{\text{sistemático}} = \left[\frac{\Delta T_2}{T_2 - T_1}\right]_{\text{sistemático}} = 1,67\% ;$$

$$(\Delta t_1)_{\text{aleatório}} = (\Delta t_2)_{\text{aleatório}} = 0,1 \text{ s}$$

$$(\Delta t_1)_{\text{sistemático}} = (\Delta t_2)_{\text{sistemático}} = 0$$

$$t_1 = 10 \text{ s} \text{ e } t_2 = 60 \text{ s}$$

$$\left[\frac{\Delta t_1/t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}\right]_{\text{sistemático}} = \left[\frac{\Delta t_2/t_2}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}\right]_{\text{sistemático}} = 0$$

$$\left[\frac{\Delta t_1/t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}\right]_{\text{aleatório}} = 0,56\% \left[\frac{\Delta t_2/t_2}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}\right]_{\text{aleatório}} = 0,1\%$$

O erro sistemático associado à medição da condutividade térmica será então:

$$\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)_{\text{sistemático}} = 0,5\% + 2 \times 0,3\% + 2 \times 1,67\% \cong 4,4\%$$

Para uma avaliação do erro sistemático através de experimentação, foram realizadas várias medições de condutividade térmica sobre um bloco de parafina, e seu valor médio comparado com aquele obtido através do método da placa quente protegida - realizado com o mesmo tipo de parafina por Güths [23] - considerado como padrão, nesta análise.

Os valores médios de condutividade térmica obtidos foram:

- com a sonda térmica, 0,22 W/mK ;
- com a placa quente protegida, 0,23 $\frac{W}{mK}$.

Dessa forma, o erro sistemático obtido experimentalmente é da ordem de 4,5%.

A despeito das estimativas feitas em algumas parcelas de erros, que podem ser até grosseiras, os valores de erro sistemático, teórico e experimental, apresentam excelente concordância.

Para a avaliação de $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{aleatório}}$, considerou-se, como apresentado por Doebelin [31], página 64, que as parcelas de erro aleatório se comportam como descrito na equação abaixo:

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\text{aleatório}} = \left\{ \left[\frac{\Delta R_m}{R_m} + 2 \frac{\Delta i}{i} \right]^2 + \left[\frac{\Delta T_2}{T_2 - T_1} + \frac{\Delta T_1}{T_2 - T_1} \right]^2 + \left[\frac{\Delta t_2 / t_2}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} + \frac{\Delta t_1 / t_1}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

Substituindo na Eq.4.13, as estimativas das parcelas de erro, obtemos:

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_{\text{aleatório}} \cong 3,6\%$$

Na próxima seção, este valor teórico de $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)_{\text{aleatório}}$ será comparado com a reprodutibilidade obtida experimentalmente - a partir de várias medições de condutividade para cada conteúdo - com o uso da relação $DM/\bar{\lambda}$, onde DM é a dispersão da medição, dada por:

$$DM = \pm fs \times DP$$

onde:

DP = desvio-padrão

fs = fator de Student.

4.4.6 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA PADRÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM FUNÇÃO DO CONTEÚDO DE UMIDADE

A sonda térmica, descrita anteriormente, foi usada para avaliar a influência do conteúdo de umidade sobre a condutividade térmica aparente da argamassa de cal e cimento.

Para tanto, várias amostras cilíndricas (100 mm ou 70 mm de diâmetro por 100 mm de altura) foram preparadas e secadas como descrito nas seções 1.1 e 1.3. Antes do processo de secagem, foi feito o furo de aproximadamente 3 mm de diâmetro, necessário para a inserção da sonda na argamassa.

Após a determinação da massa seca de cada amostra, elas são imersas em água destilada, de maneira a se obter conteúdos de umidade variando de 1% a 15% (mássico).

Duas amostras ficaram imersas em água, à pressão atmosférica, por um período de tempo de três semanas, conseguindo-se assim um conteúdo mássico de 17,5%.

Após esse processo de umidificação, as amostras são seladas com várias camadas de papéis celofane e alumínio, exceto as duas com conteúdo de 17,5% que são sempre mantidas imersas na água, e deixadas assim por um período de 30 a 45 dias.

O tempo necessário à homogeneização é maior para amostras com baixos conteúdos de umidade. Dessa maneira, procurou-se utilizar as amostras de menor volume, as com 70 mm de diâmetro, para a faixa de baixos conteúdos (até 4% - 5%).

A verificação da homogeneidade do conteúdo é feita pelo método gravimétrico: serra-se a amostra cilíndrica em vários discos de aproximadamente 1 cm de espessura. Esses discos são novamente seccionados com o uso de uma serra copo, resultando em discos menores e anéis. Supõe-se que durante o processo de serragem, a quantia de água evaporada seja a mesma para duas partes adjacentes (note-se que não estamos interessados em determinar valores absolutos de conteúdo).

Pode-se ter assim, uma idéia do grau de homogeneização do conteúdo nas direções axial e radial da amostra cilíndrica.

Para que se tivesse idéia do intervalo de tempo necessário à homogeneização, algumas amostras (abrangendo toda a faixa de conteúdos) foram submetidas à verificação.

Observou-se que para baixos conteúdos, que é o caso crítico, esse tempo era de duas semanas, com pequenas variações de conteúdo nas partes seccionadas.

Decidiu-se então, que o tempo mínimo necessário à homogeneização das amostras seria de quatro semanas.

Finalmente, a condutividade térmica aparente foi medida para os vários conteúdos utilizando-se duas sondas térmicas diferentes.

Antes de cada experimentação, mede-se novamente a massa úmida das amostras: de fato, durante o período utilizado para a homogeneização (30 a 45 dias) há uma pequena perda de água por evaporação.

Durante o período de tempo utilizado para a medição da condutividade térmica, as amostras continuam protegidas com papéis celofane e alumínio, para evitar a evaporação de água.

Na Fig.4.7 é mostrada a curva que representa a variação da condutividade em função do conteúdo, obtida para a argamassa, a 25°C, nas condições experimentais especificadas acima.

Para cada amostra, foram feitas seis medições de condutividade: três com cada sonda. Para o conteúdo de 17,5% (em

massa), duas amostras diferentes foram experimentadas, num total de doze medições.

Na tabela 4.1 mostra-se, na primeira e segunda colunas, os valores médios de condutividade térmica para cada conteúdo.

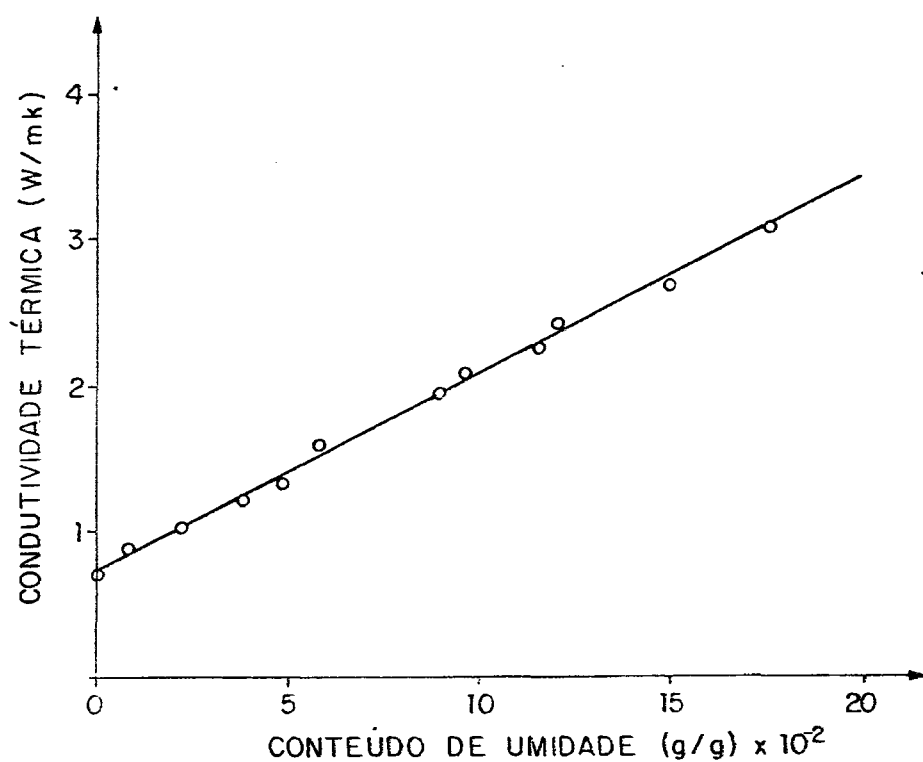


Fig.4.7 - Condutividade térmica aparente em função do conteúdo de umidade (argamassa de cal e cimento a 25°C).

Tabela 4.1 - Redução dos dados experimentais de medição de condutividade.

CONTEUDO DE UMI DADE (g/g)%	$\bar{\lambda}$ (W/mK)	$\frac{DM}{\bar{\lambda}}$ %	CONTEUDO CALCULADO ATRAVÉS DA RETA PADRÃO W_c	$\left \left(\frac{W - W_c}{W} \right) \right \%$
0,0	0,72	3,61	—	—
0,8	0,88	7,15	1,0	25,00
2,1	1,02	1,17	2,1	0,00
2,2	1,03	7,57	2,2	0,00
3,8	1,22	4,26	3,6	5,26
4,8	1,33	2,37	4,4	8,33
5,8	1,57	5,67	6,2	6,90
8,9	1,96	2,11	9,1	2,25
9,6	2,09	1,30	10,0	4,17
11,5	2,25	3,93	11,2	2,61
12,0	2,41	1,95	12,4	3,33
14,9	2,68	4,78	14,4	3,40
17,5	3,08	6,33	17,4	0,60

Na terceira coluna é apresentado o parâmetro indicativo de reprodutibilidade, $DM/\bar{\lambda}$, para cada conjunto de medidas: as dispersões encontradas variam entre 1,2% e 7,6% o que assegura uma boa reprodutibilidade nos testes com a sonda térmica. O erro aleatório calculado na seção anterior (3,6%) é da mesma ordem de magnitude que alguns dos valores obtidos experimentalmente, sendo superior ou inferior a outros, ver tabela 4.1.

A gama de variação nos erros aleatórios experimentais, pode ser atribuída a interferências externas no sistema de medição, principalmente ruídos, não passíveis de blindagem e/ou filtragem com o sistema utilizado.

4.4.7 - COMENTÁRIOS A RESPEITO DO MÉTODO DA SONDA TÉRMICA

O método transiente da sonda térmica, permite a medição da condutividade térmica aparente de materiais porosos,

com uma pequena interferência no meio a ser medido.

De fato, o intervalo de tempo requerido para cada medição de condutividade é pequeno, da ordem de 60 s para a argamassa em toda a faixa de conteúdo de umidade.

Ainda, a elevação de temperatura na sonda, que é superior a do meio, é da ordem de 3°C.

Os dois fatores citados acima são importantes para que não ocorram:

- convecção de fluido (ar, água líquida ou vapor) no interior dos poros;
- migração de umidade, devido gradientes de temperatura.

Por outro lado, pode-se observar na tabela 4.1, que os desvios percentuais encontrados quando da comparação do conteúdo de umidade experimental com o calculado através da reta padrão $W = W(\lambda)$, se mostram relativamente baixos, com exceção do conteúdo para a condutividade térmica de 0,88 W/mK.

A reta padrão, $W = W(\lambda)$, será utilizada no capítulo seguinte para a obtenção dos perfis de conteúdo de umidade nas colunas de argamassa.

CAPÍTULO 5

5 - ESTUDO DA MIGRAÇÃO DE UMIDADE

No capítulo 2 foi estudada a condição de equilíbrio termodinâmico entre a parede sólida do poro, a água líquida e vapor.

Esta condição de equilíbrio é resultado da uniformidade espacial de variáveis como temperatura e pressão de cada fase, ou seja, do equilíbrio de potencial, como foi visto na seção 2.1.1.

Quando não há a uniformidade espacial das grandezas citadas, ocorre o aparecimento de fenômenos de transferência, de massa e calor, no meio poroso.

A análise apresentada neste trabalho se limita à transferência de umidade isotérmica, devida a gradientes de conteúdo de umidade, excluindo-se os gradientes de temperatura no meio poroso.

O estudo de transferência se mostra assaz complicado devido a principalmente dois fatores: a existência e interação de duas fases - água líquida e vapor - no meio poroso e a complexidade geométrica da estrutura porosa.

Pode-se analisar os fenômenos de transferência sob dois pontos de vista: microscópico e macroscópico. Em uma escala microscópica, analisa-se separadamente, a nível de poro, os fenômenos envolvendo as fases líquida e vapor.

Do ponto de vista macroscópico, torna-se difícil a separação dos fenômenos e o estudo se faz através da definição de coeficientes globais de transferência, levando-se em conta a ação conjunta dos vários processos.

Esses coeficientes são característicos de cada material e determinados experimentalmente. Eles procuram estabelecer uma relação entre o fluxo de umidade e os gradientes de potencial que o provocam.

Nesta visão determinística, utiliza-se o modelo de Philip e De Vries [24], que procura explicar os fenômenos de transferência de umidade através de mecanismos clássicos de difusão de vapor e movimento de líquido por capilaridade. Uma revisão teórica deste modelo é apresentada neste capítulo.

A análise experimental de migração de umidade é feita, utilizando a técnica de infiltração horizontal em colunas da argamassa de cal e cimento. A sonda térmica, capítulo 4, é utilizada para acompanhar a evolução do perfil de umidade nas colunas.

Este experimento de infiltração permite obter a dependência da difusividade isotérmica de umidade - um parâmetro global envolvendo migração de água e vapor - com o conteúdo de umidade, possibilitando uma análise do comportamento hídrico da argamassa.

5.1 - ESTUDO TEÓRICO

5.1.1 - O CONCEITO DE VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO

Nos estudos dos fenômenos de transferência em meios porosos, sob o ponto de vista macroscópico, torna-se necessário tomar valores médios de diversas grandezas físicas sobre um volume elementar.

Desse modo, define-se uma esfera de raio r_a , em torno de um ponto no meio poroso, e analisa-se o comportamento de uma grandeza G qualquer, em função de r_a , Fig.5.1.

Enquanto r_a é da mesma ordem de grandeza que o raio dos poros, a grandeza G apresenta fortes flutuações, que vão diminuindo pouco a pouco com o aumento de r_a , até que passa a evoluir de maneira regular a partir de $(r_a)_{\text{elementar}}$.

Dessa maneira, a dimensão $(r_a)_{\text{elementar}}$ define o volume elementar representativo, usando-se esse volume para obter os valores médios das diversas grandezas que caracterizam o meio poroso.

Para que a grandeza macroscópica seja corretamente definida, é necessário que, calculada em dois pontos do meio cuja distância seja da ordem de $(r_a)_{\text{elementar}}$, apresente valores tais que a diferença entre esses valores seja pequena em relação às flutuações locais.

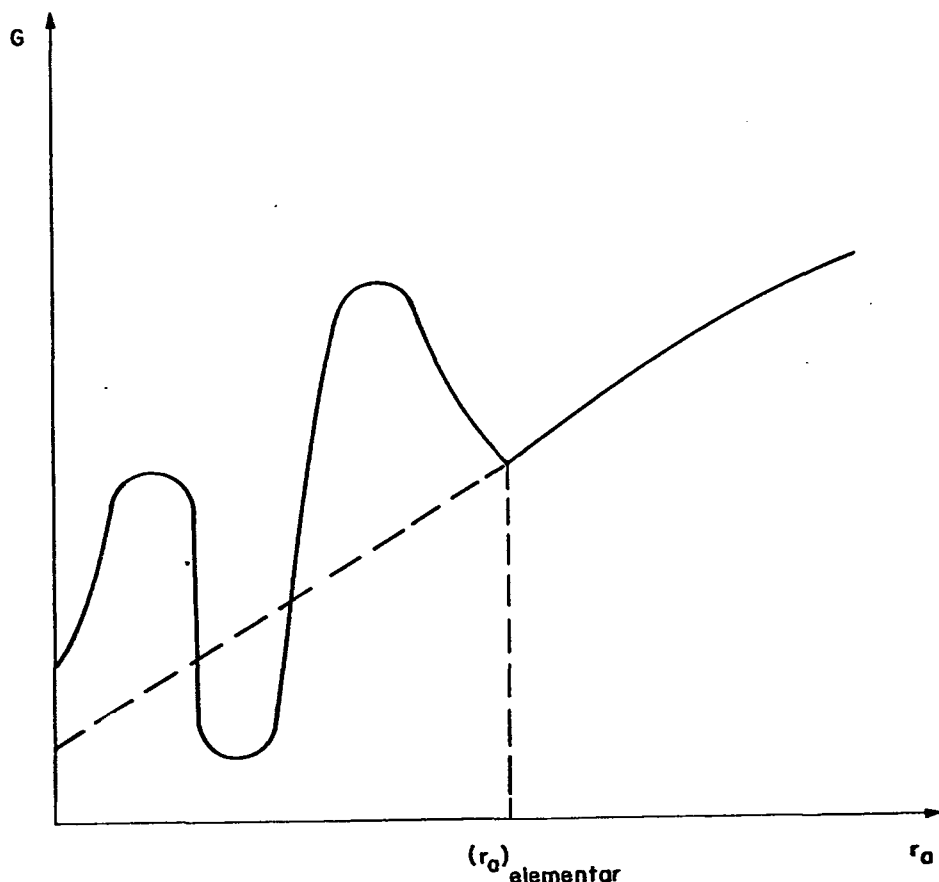


Fig. 5.1 - A noção de volume elementar representativo, Daian [3].

5.1.2 - EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA MACROSCÓPICA. O MODELO DE PHILIP E DE VRIES

As hipóteses adotadas para o modelo são:

- Dissociação do fluxo de umidade nas fases líquida e vapor, supostas contínuas e distintas, de maneira que a sua soma representa o fluxo total:

$$\vec{q}_{total} = \vec{q}_l + \vec{q}_v ,$$

\vec{q} é o vetor densidade de fluxo, com unidades $[Kg.m^{-2}.s^{-1}]$;

- Equilíbrio termodinâmico local líquido vapor: em todo ponto do meio poroso, as diferentes fases apresentam o mesmo potencial;
- A água adsorvida é rígida, não contribuindo para a formação do

fluxo de umidade;

- A transferência de umidade na fase líquida é regida pela lei de Darcy;
- O transporte de vapor se dá por difusão molecular livre - os poros são de dimensões características bastante superiores ao caminho livre médio das moléculas - na fase gasosa;
- O vapor de água é um gás perfeito;
- Na fase gasosa a pressão é uniforme e igual à pressão atmosférica.

5.1.2.1 - Expressão para o Fluxo de Líquido

A lei de Darcy para meios porosos insaturados, em sistemas em que a ação da gravidade pode ser negligenciada, se escreve:

$$\vec{q}_l / \rho_l = - K_c(\theta, T) \vec{\nabla} \psi \quad (5.1)$$

onde:

\vec{q}_l = Vetor densidade de fluxo de líquido, $[\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$;

K_c = Condutividade Hidráulica insaturada, $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$;

ψ = Potencial matricial, [m].

Tomando o conteúdo de umidade θ e a temperatura T como variáveis independentes e escrevendo:

$\psi = \psi(\theta, T)$, vem:

$$\frac{\vec{q}_l}{\rho_l} = - D_{\theta l} \vec{\nabla} \theta - D_{Tl} \vec{\nabla} T \quad (5.2)$$

onde:

$$D_{\theta l} = K_c(\theta, T) \left. \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right|_T \quad (5.3)$$

$$D_{tl} = K_c(\theta, T) \left. \frac{\partial \psi}{\partial T} \right|_{\theta} \quad (5.4)$$

D_{el} é a difusividade isotérmica de líquido - devida a gradientes de conteúdo de umidade - e D_{tl} é a difusividade de líquido devida a gradientes de temperatura. O fluxo de líquido foi então separado em duas componentes: uma devida ao gradiente de temperatura e outra devida ao gradiente de conteúdo de umidade.

Philip e De Vries assumiram que a variação do potencial matricial com a temperatura está associada à variação da tensão superficial com a temperatura, $\sigma(T)$ e dessa forma:

$$\frac{\partial \psi}{\partial T} = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \psi ;$$

Definindo $\beta = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT}$, obtém-se:

$$D_{tl} = \beta \psi K_c \quad (5.5)$$

5.1.2.2 - Expressão para o Fluxo de Vapor

Philip e de De Vries utilizaram a equação para difusão do vapor, lei de Fick, modificada de modo a ser utilizada em meios porosos:

$$\vec{q}_v = - D_{atm} \nu \tau (n - e) \vec{\nabla} \rho_v \quad (5.6)$$

onde:

\vec{q}_v = Vetor densidade de fluxo de vapor, $[Kg.m^{-2}.s^{-1}]$;

D_{atm} = Coeficiente de difusão molecular livre do vapor de água no ar, $[m^2.s^{-1}]$;

ν = Coeficiente de Stefan: é relativo a difusão do ar na mistura ar-vapor de água.

A expressão para ν se escreve:

$$\nu = \frac{P}{P - P_v}$$

onde:

p = pressão total;

p_v = pressão parcial do vapor.

Nas condições de temperatura e pressão de nossas experiências ν é assumido igual à unidade, Philip e De Vries [24].

$n - \theta$ = Conteúdo volumétrico de ar (diferença volumétrica entre a porosidade e o conteúdo de umidade). Este parâmetro exprime o fato de as ilhas de líquido diminuírem a seção de passagem do vapor.

τ = Fator de tortuosidade; parâmetro geométrico adimensional para levar em consideração as trajetórias não retilíneas da difusão de vapor nos poros.

Para separar o fluxo de vapor na componente devida a gradientes de temperatura e naquela devida a gradientes de conteúdo de umidade, Philip e De Vries introduziram a relação termodinâmica, Edlefsen e Anderson [25]:

$$\rho_v = \rho_{vs} h = \rho_{vs} \exp\left(\frac{vg}{RT}\right) \quad (5.7)$$

onde ρ_{vs} é a densidade do vapor de água saturado, $[\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}]$.

Da Eq. 5.7 tem-se:

$$\nabla \rho_v = \rho_{vs} \nabla h + h \nabla \rho_{vs} \quad (5.8)$$

Philip e De Vries assumiram para toda faixa de h que $\left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{\theta} = 0$ e portanto $h = h(\theta)$.

Como a densidade do vapor de água saturado é função apenas da temperatura, a Eq.5.8 se torna:

$$\vec{\nabla} \rho_v = h \frac{d\rho_{vs}}{dT} \vec{\nabla} T + \rho_{vs} \frac{dh}{de} \vec{\nabla} e \quad (5.9)$$

Substituindo a expressão para $\vec{\nabla} \rho_v$ na equação para o fluxo de vapor, Eq.5.6, vem:

$$\frac{\vec{q}_v}{\rho_l} = - D_{tv} \vec{\nabla} T - D_{ev} \vec{\nabla} e \quad (5.10)$$

onde:

$D_{tv} = - D_{atm} \tau \frac{(n - e)}{\rho_l} h \frac{d\rho_{vs}}{dT}$, a difusividade de vapor devida a gradientes de temperatura;

$D_{ev} = - D_{atm} \tau \frac{(n - e)}{\rho_l} \rho_{vs} \frac{dh}{de}$, a difusividade de vapor devida a gradientes de conteúdo.

5.1.2.3 - Interação entre Vapor e Ilhas de Líquido

Em um meio poroso relativamente seco, não há continuidade da fase líquida; a água se apresenta adsorvida nas paredes dos poros ou na forma de pequenas ilhas, como esquematizado na Fig.5.2.

Segundo Philip e De Vries, vapor se difunde no ar contido nos poros e também através das ilhas de líquido, como será explicado a seguir.

Na Fig.5.2, estão representados os dois meniscos de uma ilha de líquido, na condição de equilíbrio termodinâmico.

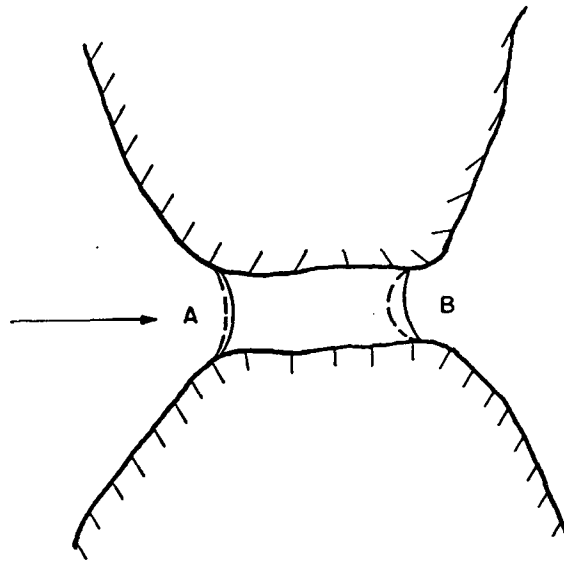


Fig.5.2 - Transferência de umidade através de uma ilha de líquido.

Inicialmente as curvaturas dos meniscos são iguais e estão representadas pelas linhas cheias.

Suponha-se agora que um gradiente de pressão de vapor, devido um campo de temperatura, produz um fluxo de vapor na direção indicada pela seta da Fig.5.2.

O vapor se condensa ao atingir o menisco A, resultando em um aumento do seu raio de curvatura (o novo menisco é representado pela linha tracejada).

No menisco B, ocorre uma diminuição do raio de curvatura devido a evaporação de líquido.

A diferença de curvatura produz um fluxo de líquido capilar, igual á taxa de evaporação e condensação nos meniscos.

O fluxo de vapor é determinado por um gradiente na pressão de vapor através dos poros preenchidos com ar e o movimento das ilhas de líquido se ajusta com a finalidade de equilibrar o fluxo de vapor.Podemos então dizer que as ilhas de líquido têm a propriedade de acomodar o fluxo de vapor.

5.1.2.4 - A Introdução de Dois Fatores Corretivos na Expressão da Difusividade de Vapor devido Gradiente de Temperatura

Philip e De Vries introduziram dois fatores corretivos, $f(\theta)$ e ζ , na expressão para D_{TV} , em substituição do termo $\tau(n-\theta)$, devido:

- A transferência de umidade através das ilhas de líquido por mecanismos de condensação-evaporação nas interfaces, que acomoda o fluxo de vapor, seção 5.1.2.3;
- Aos comportamentos térmicos diferentes das diversas fases - líquida, gasosa e sólida - constituintes de um meio poroso.

A expressão para D_{TV} , se escreve agora:

$$D_{TV} = - \frac{D_{atm}}{\rho_l} f(\theta) \zeta h \frac{d\rho_{vs}}{dT}, \text{ onde:}$$

$$f(\theta) = \begin{cases} n, & \text{para } \theta < \theta_k \\ (n - \theta) \left[1 + \frac{\theta}{(n - \theta_k)} \right], & \text{para } \theta > \theta_k \end{cases}$$

θ_k é o conteúdo de água crítico que define o limite de continuidade da fase líquida.

$$\zeta = \frac{(\nabla T)_a}{\nabla T} = \frac{(\nabla T)_a}{(n-\theta) (\nabla T)_a + \theta (\nabla T)_l + (1-n) (\nabla T)_s},$$

onde:

$(\nabla T)_a$, $(\nabla T)_l$ e $(\nabla T)_s$ são os gradientes de temperatura médios sobre os volumes ocupados pelo ar, líquido e sólido respectivamente;

(∇T) é o gradiente térmico global no meio poroso.

Para uma explicação detalhada da introdução dos fatores $f(\theta)$ e ζ na expressão de D_{TV} , consultar as páginas 226, 227 e 228 de Philip e De Vries [24].

5.1.2.5 - Expressão para a Densidade do Fluxo de Massa

A densidade de fluxo total é a soma das densidades de fluxo de líquido e de vapor:

$$\vec{q}_{total}/\rho_l = \vec{q}_l/\rho_l + \vec{q}_v/\rho_l = -D_e \vec{\nabla}e - D_T \vec{\nabla}T \quad (5.11)$$

onde:

$D_e = D_{el} + D_{ev}$, é a difusividade isotérmica de unidade, que engloba a migração de água líquida e seu vapor devida a gradientes de conteúdo de umidade;

$D_T = D_{Tl} + D_{Tv}$, é a difusividade de unidade (água líquida e seu vapor) devida a gradientes de temperatura.

A equação da conservação da massa se escreve:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\frac{\vec{q}_{total}}{\rho_l} \right] \quad (5.12)$$

com $e = e_l + e_v$, onde:

$e_l =$ Conteúdo de líquido volumétrico, $\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \right]$;

$e_v =$ Conteúdo de vapor volumétrico, $\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \right]$.

Pela substituição da Eq.5.11 na 5.12, vem:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[D_e \vec{\nabla}e + D_T \vec{\nabla}T \right] \quad (5.13)$$

5.1.2.6 - Migração de Umidade no Caso Isotérmico

Considere-se agora, o que será o caso das experiências realizadas neste trabalho, a migração de água em condições

isotérmicas, $\vec{\nabla}T = 0$.

A equação para a densidade de fluxo de umidade, Eq.5.11, se reduz a:

$$\vec{q}_{\text{total}}/\rho_l = - D_e \vec{\nabla}e \quad (5.14)$$

e a equação da conservação da massa, Eq.5.13 se torna:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = - \nabla \cdot (D_e \vec{\nabla}e) \quad (5.15)$$

5.1.2.7 - Evolução dos Coeficientes de Transferência Isotérmica

O comportamento dos coeficientes de transferência isotérmica - a difusividade isotérmica de líquido D_{el} e a difusividade de vapor devida a gradientes de conteúdo D_{ev} - em relação ao conteúdo de umidade é mostrado na Fig.5.3, como previsto por De Vries [26] e apresentado por Merouani [4] e Daian [3].

- Para os baixos conteúdos de umidade, $e < e_k$, a fase condensada se apresenta na forma adsorvida ou em ilhas capilares isoladas; a transferência de vapor é a única em jogo. Ainda na região de $e < e_k$, D_{ev} atinge um máximo e em seguida seu valor começa a diminuir. Isto é explicado pelo aumento em número e tamanho das ilhas capilares, que reduzem a seção de passagem do fluxo de vapor. De fato, nas pequenas ilhas de líquido, ocorre difusão de vapor através de mecanismos de condensação-evaporação nas interfaces, entretanto, nas ilhas maiores, isto não acontece, devido o aumento do raio de curvatura que elas sofrem. Quando se estabelece a continuidade da fase líquida, $e = e_k$, o coeficiente D_{el} aumenta rapidamente em detrimento a D_{ev} .

- Para os altos conteúdos de umidade, a transferência da fase líquida é notadamente predominante.

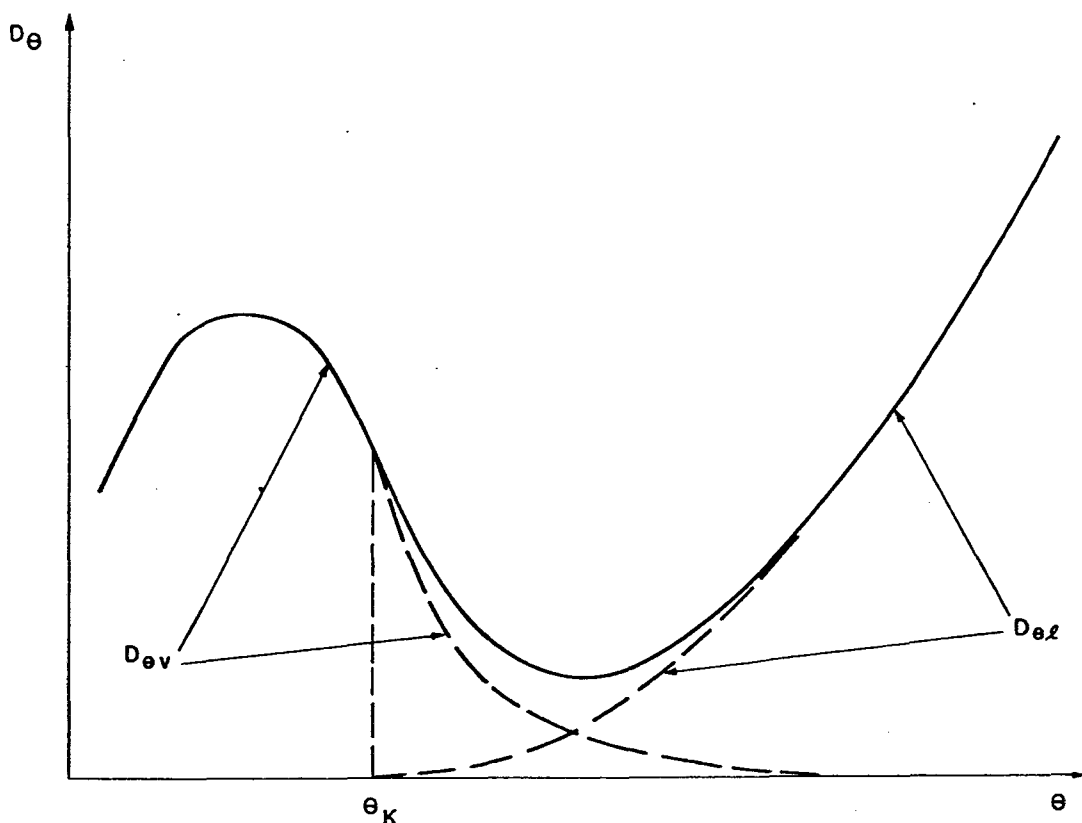


Fig.5.3 - Evolução dos coeficientes de transferência isotérmica com o conteúdo de umidade.

5.2 - ESTUDO EXPERIMENTAL DA MIGRAÇÃO DE UMIDADE

Para este estudo, considerou-se o método sugerido por Bruce e Klute [16], de infiltração horizontal de água em colunas de material poroso com seção transversal constante e comprimento semi-infinito, tendo um conteúdo inicial de água e_i uniforme. No instante $t = 0$, aplica-se e mantém-se em uma das faces da coluna - assumida como posição $x = 0$ - um potencial ψ_f , que corresponde a uma condição de conteúdo de umidade e_f constante (considera-se apenas o caso de embebição).

5.2.1 - DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Apresenta-se na Fig.5.4 um esquema do arranjo experimental utilizado nos estudos de migração de umidade em colunas da argamassa de cal e cimento.

As colunas de argamassa têm seção quadrada de $70 \times 70 \text{ mm}^2$ e comprimento de 150 ou 200 mm.

A face de infiltração é levemente lixada e lavada (para que se retire o pó resultante) a fim de corrigir possíveis distorções na estrutura porosa, próximo à superfície, ocasionadas pelo acabamento (tipo fórmica) da parede do molde.

O restante da região A, ver Fig.5.4, é protegido contra a evaporação de umidade pela aplicação de uma resina impermeabilizante.

A região B, inclusive a face posterior da coluna, é impermeabilizada com o uso de várias camadas de um plástico muito delgado (marca comercial Rolopac).

A impermeabilização apresenta o inconveniente de impedir o escape de ar - presente nos poros - quando a frente de molhamento avança na coluna, todavia, ela evita a evaporação de umidade, assegurando um escoamento unidimensional.

Acredita-se ainda que, dado o grande comprimento da coluna, e uma pequena folga existente entre as camadas de plástico e a coluna (principalmente na face posterior), o aumento de pressão, acima da atmosférica, que seria ocasionado pelo aprisionamento do ar, possa ser negligenciado.

Um bocal - fabricado com fibra de vidro - é posicionado na face de infiltração, sendo que os espaços vazios entre ele e a coluna, impermeabilizada com resina, são preenchidos com uma massa vedante.

A alimentação de água, numa condição de sucção, é feita com o auxílio de um tubo de Mariotte, capaz de manter a pressão constante na face de infiltração da coluna.

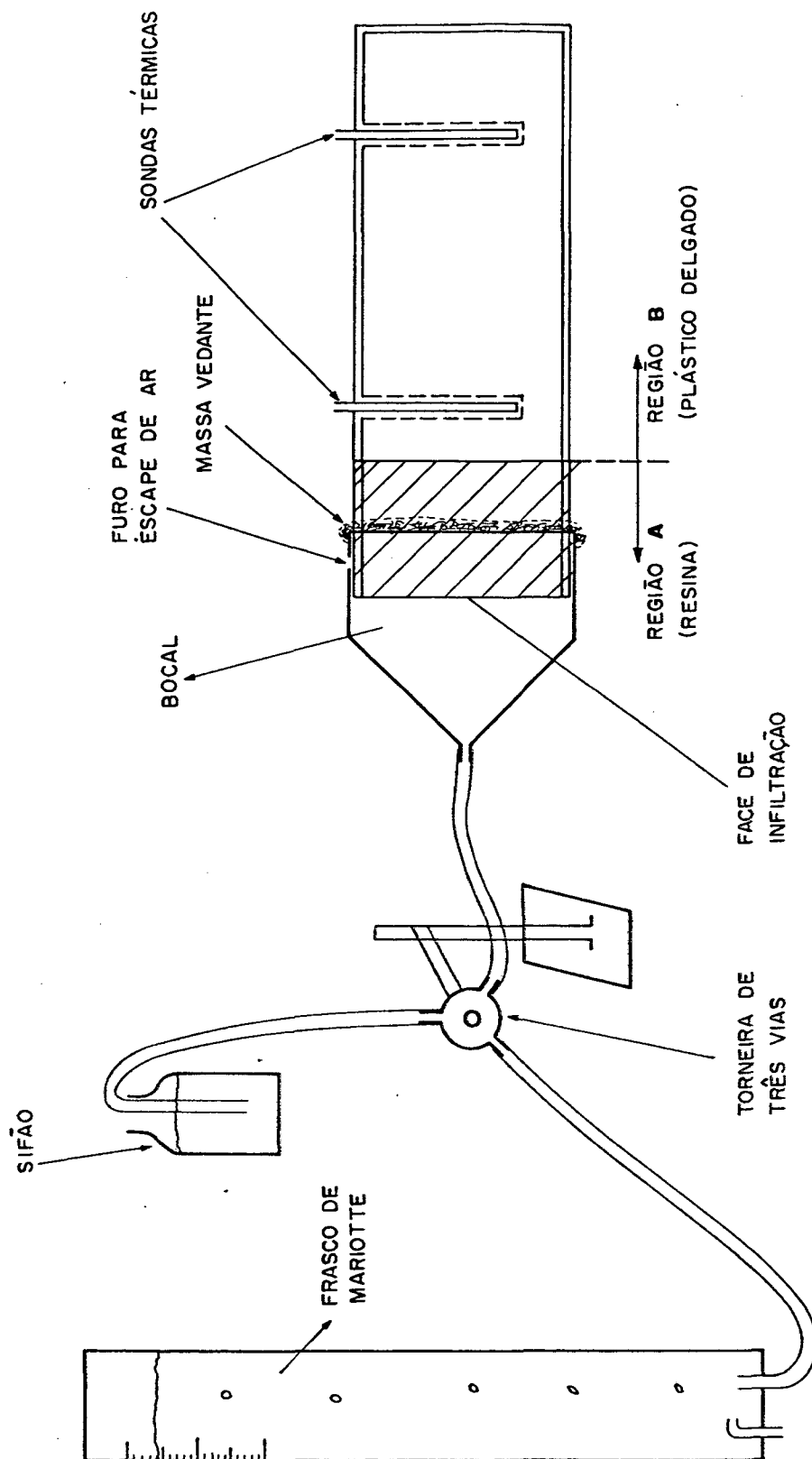


Fig.5.4 - Aparato experimental para o estudo da migração de umidade.

Antes de se iniciar o experimento, o volume associado ao bocal é preenchido com água com o uso de um frasco auxiliar, estando o sistema posicionado na vertical.

Quando a água toca na face de infiltração da coluna, a alimentação passa a ser feita pelo tubo de Mariotte, com controle realizado pela torneira de três vias, e o sistema é posicionado na horizontal.

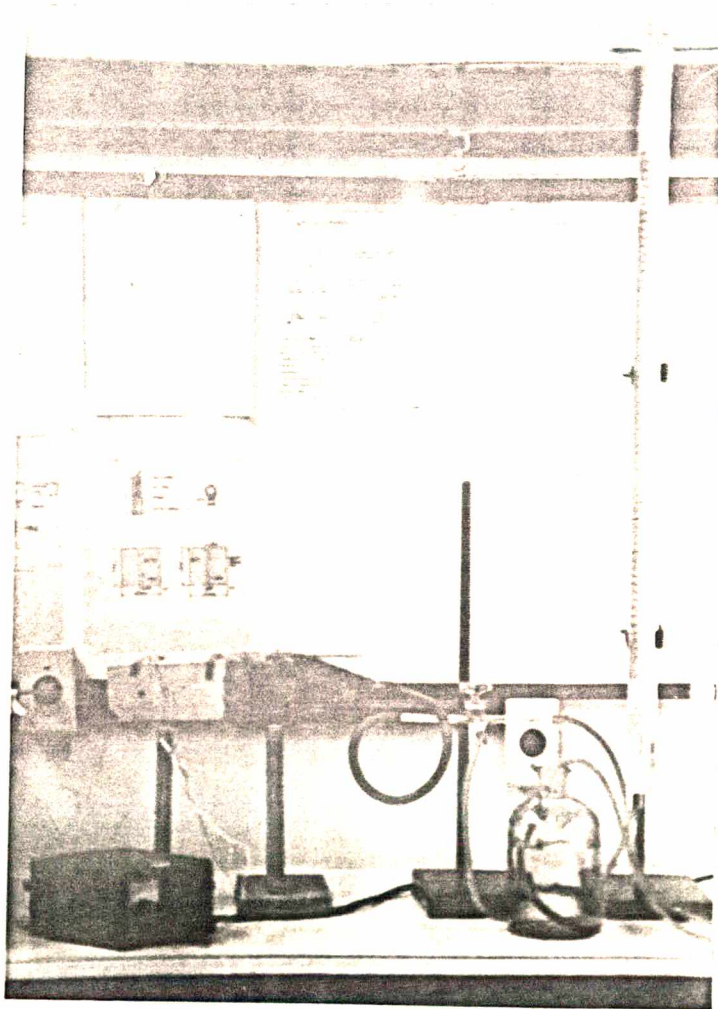
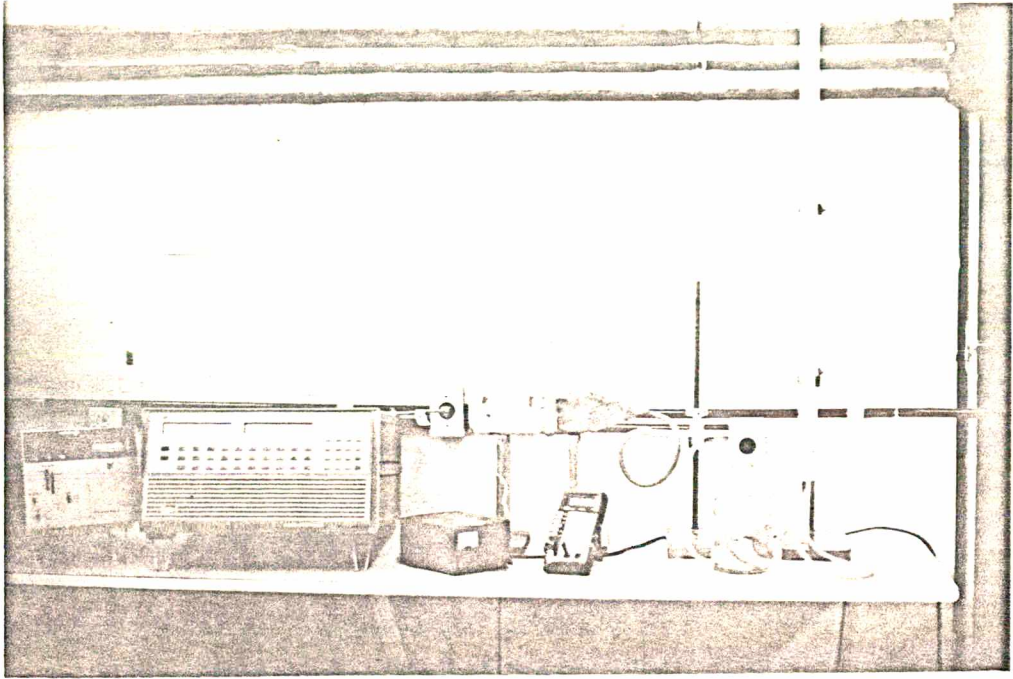
O furo para escape de ar, ver Fig.5.4, é fechado com massa vedante, tão logo a água proveniente do frasco auxiliar toque na face de infiltração.

Para acompanhar a evolução do conteúdo de umidade na coluna, duas sondas térmicas são posicionadas a 65 e 115 mm da face de infiltração.

O conteúdo inicial θ_i da coluna, corresponde ao conteúdo de umidade residual após a impermeabilização. Sua homogeneidade é verificada nos dois pontos onde as sondas estão localizadas antes de se iniciar a infiltração.

O intervalo de tempo necessário para cada medição de conteúdo é em torno de 60 s, e o intervalo entre duas medições consecutivas, para cada sonda, varia de 300 s a 600 s, devido a necessidade de reestabelecimento do equilíbrio térmico.

Os experimentos são realizados em laboratório com condicionamento de ar, o que permite um controle de temperatura em $25 \pm 1^\circ\text{C}$. A duração total de cada infiltração é de aproximadamente oito horas. Na Fig.5.5 mostra-se algumas fotografias do conjunto experimental utilizado.





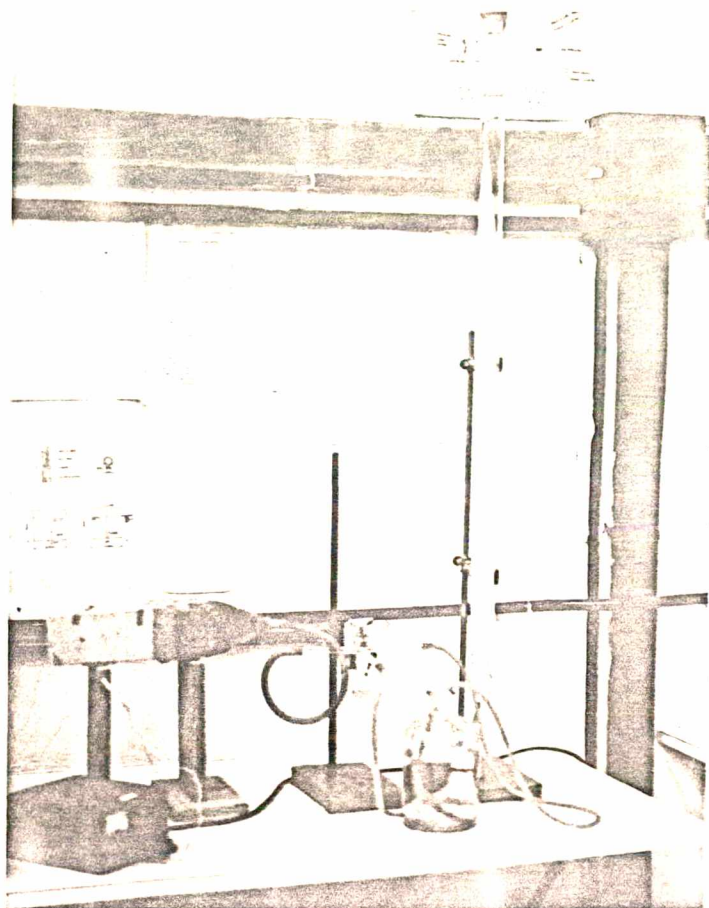


Fig.5.5 - Fotografias do aparato experimental para o estudo da migração de umidade.

5.2.2 - MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE INFILTRAÇÃO HORIZONTAL

A formulação matemática para o experimento de infiltração horizontal descrito na seção anterior, é feita, considerando-se a Eq.5.15, que para o caso unidimensional se escreve:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\theta}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (5.16)$$

Sujeita às condições de contorno e inicial:

$$\theta = \theta_f \text{ para } x = 0 \text{ e } t > 0 ,$$

$$\theta = \theta_i \text{ para } x \rightarrow \infty \text{ e } t > 0 ,$$

$$\theta = \theta_i \text{ para } x > 0 \text{ e } t = 0 .$$

A resolução é feita, utilizando a transformada de Boltzmann - veja-se apêndice D -, uma função unívoca $\eta = \eta(\theta)$ dada por:

$$\eta(\theta) = x t^{-\frac{1}{2}}$$

Utilizando-se a transformada de Boltzmann na Eq.5.16, vem:

$$\frac{\eta}{2} \frac{d\theta}{d\eta} = - \frac{d}{d\eta} \left[D_{\theta}(\theta) \frac{d\theta}{d\eta} \right] \quad (5.17)$$

Com as condições de contorno:

$$\theta = \theta_f \text{ para } \eta = 0,$$

$$\theta = \theta_i \text{ para } \eta \rightarrow \infty.$$

Integrando-se a Eq.5.17, sujeita às condições de contorno dadas acima, obtém-se:

$$D_{\theta}(\theta) = \frac{-1}{2 \frac{d\theta}{d\eta}} \int_{\theta_i}^{\theta} \eta(\theta) d\theta \quad (5.18)$$

A Eq.5.18 nos permite conhecer a dependência da difusividade isotérmica de umidade com o conteúdo de umidade, através da função $\eta = \eta(\theta)$, obtida experimentalmente.

5.2.3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS. AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA

Foram realizados dois experimentos de infiltração, da maneira descrita na seção 5.2.1, utilizando-se colunas distintas. Os conteúdos iniciais foram de 1% e 2% (em massa) para os testes 1 e 2, respectivamente.

No gráfico da Fig.5.6 mostra-se a distribuição do conteúdo de umidade nas colunas, para os testes 1 e 2, em função da variável $\eta = x t^{-\frac{1}{2}}$.

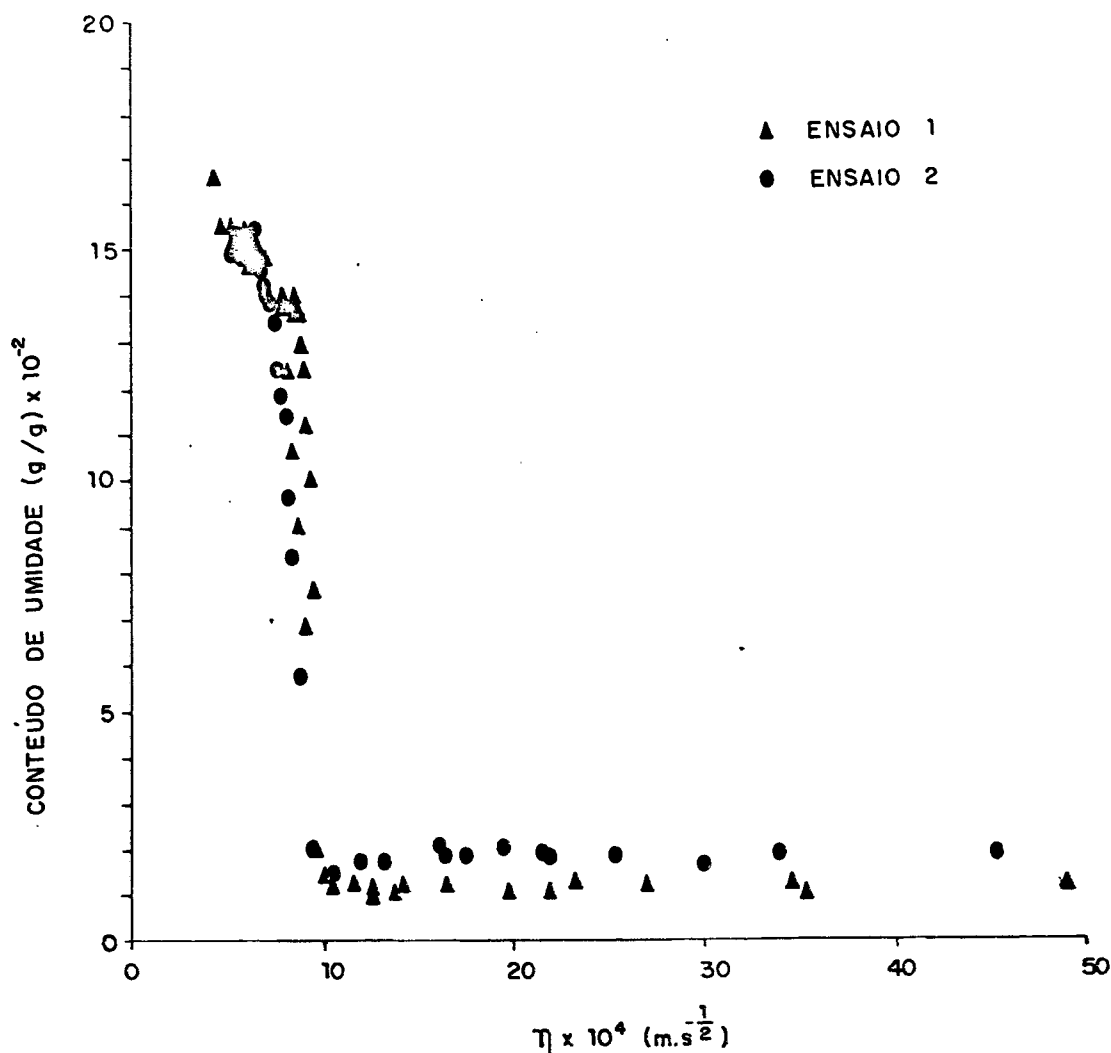


Fig.5.6 - Distribuição do conteúdo de umidade nas colunas para os testes 1 e 2.

Quando comparadas com as distribuições de conteúdo de umidade obtidas por Daian [3] e Merouani [4], em estudos de infiltração de água em colunas de materiais porosos consolidados utilizando a técnica de atenuação de raios-gama para medição do conteúdo, as distribuições mostradas na Fig.5.6 parecem apresentar uma menor dispersão dos pontos experimentais.

Para o cálculo da difusividade isotérmica de umidade, através da Eq.5.18, traçou-se manualmente uma curva sobre os pontos experimentais $\theta = \theta(\eta)$ de ambos os testes. Para os conteúdos mássicos superiores a 5%, a curva traçada manualmente procurou representar os pontos experimentais dos dois testes, entretanto, para os conteúdos menores que 5%, ela acompanhou os

pontos do teste 1, dado que para este ensaio o conteúdo inicial e_i é menor (1% em massa).

Vários outros pesquisadores têm-se utilizado do artifício de traçado manual da curva da distribuição de conteúdo $e = e(\eta)$, p.ex., Quadri [17] e Merouani [4].

O uso da Eq.5.18 requer ainda a avaliação da integral

$$\int_{e_i}^e \eta(e) de \text{ e da derivada } de/d\eta.$$

A integral foi calculada pela regra dos trapézios, enquanto que a derivada pelo método de diferenciação geométrica, já mencionado na seção 3.2 e apresentado no apêndice B.

Foi feita ainda, uma estimativa da difusividade de vapor devido gradientes de conteúdo D_{ev} , cuja expressão é dada por, seção 5.1.2.2:

$$D_{ev} = - D_{atm} \tau (n - e) \frac{\rho_{vs}}{\rho_l} \frac{dh}{de}$$

Para o cálculo de D_{ev} em função do conteúdo de umidade, é necessário o conhecimento do fator de tortuosidade τ e da variação da umidade relativa com o conteúdo de umidade $\frac{dh}{de}$ para a argamassa de cal e cimento.

Para o fator de tortuosidade, utilizou-se o valor $\tau = 0,5$, que é um valor classicamente adotado, segundo Merouani [4], página 75.

A variação da umidade relativa com o conteúdo de umidade foi avaliada a partir dos dados experimentais obtidos no ensaio de adsorção a 25°C, seção 2.2.4.

No gráfico da Fig.5.7 pode ser observada a dependência da difusividade isotérmica de umidade com o conteúdo de umidade obtida a partir dos ensaios de infiltração em colunas da argamassa com o modo operacional e metodologia como descritos anteriormente.

No mesmo gráfico da Fig.5.7, apresenta-se também o comportamento do coeficiente D_{ev} com o conteúdo de umidade, obtido através de uma estimativa como descrito nesta seção.

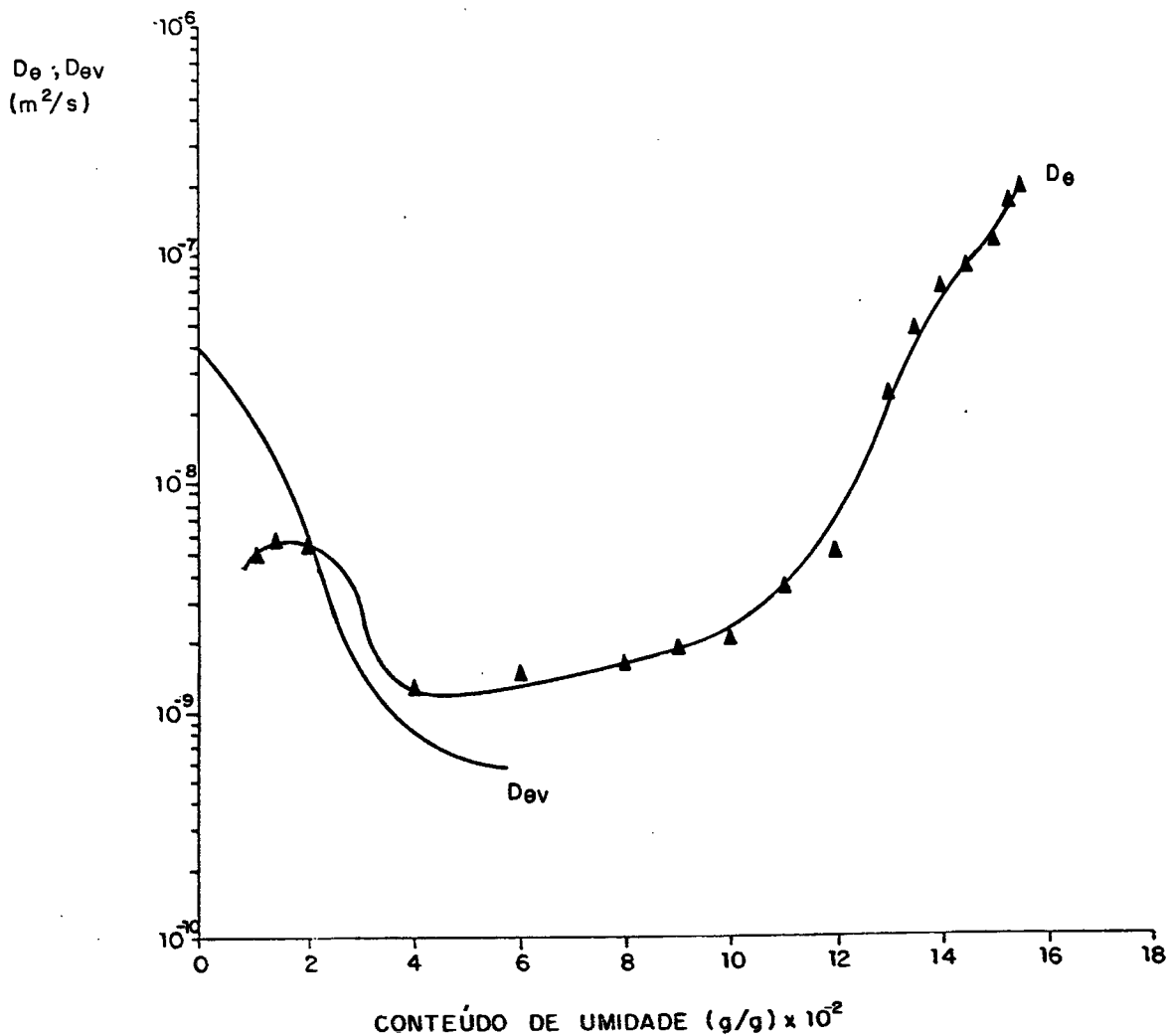


Fig.5.7 - Dependência da difusividade isotérmica de umidade D_e (obtida experimentalmente) e da estimativa do coeficiente D_{ev} com o conteúdo de umidade ($25^\circ C$).

5.2.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como foi dito, a difusividade isotérmica de umidade D_e é um parâmetro que engloba a migração de água líquida e vapor devido a gradientes de conteúdo de umidade. Para baixos conteúdos de umidade, inferiores a 4% em massa, os valores do coeficiente de transferência D_e são comparáveis aos valores de D_{ev} . Fig.5.7. Esta é a região de domínio da difusão de vapor, onde o volume de água condensada capilar é muito pequeno.

Podemos observar na Fig.5.7, que os valores estimados para a difusividade de vapor devido gradientes de conteúdo D_{ev} se apresentam maiores que os valores experimentais de D_e , para conteúdos de umidade mássicos menores que 2%.

Isto pode ser atribuído a uma provável sobreestimação do fator de tortuosidade τ e do coeficiente de difusão molecular livre D_{atm} .

De fato, podemos constatar na argamassa, veja-se Fig.3.6, uma grande concentração de poros com diâmetro inferior ao caminho livre médio das moléculas - que é da ordem de $0,1 \mu m$, ver páginas 68 e 69 de [4] - onde a difusão de vapor de água no ar não é livre, mas condicionada por choques entre as moléculas e contra a parede do poro, caracterizando o transporte misto de Knudsen, com um coeficiente de difusão inferior a D_{atm} .

Por outro lado, o valor $\tau = 0,5$, é característico para estruturas porosas de solos, que podem diferir radicalmente da estrutura da argamassa.

Deve ainda ser salientado que para os conteúdos de umidade menores que 2% (em massa), é difícil a concordância da curva $\theta = \theta(\eta)$ - ou $W = W(\eta)$ - próximo da linha de $\theta = e_i$, o que deve ocasionar incertezas na obtenção de $D_e(\theta)$ nessa região. De fato, a incerteza nos valores de $D_e(\theta)$ depende essencialmente da qualidade do traçado manual da curva $\theta = \theta(\eta)$ sobre os pontos experimentais e da incerteza na avaliação da derivada $d\theta/d\eta$ e da integral $\int_{e_i}^{\theta} \eta d\theta$.

Para os conteúdos médios, o coeficiente D_e tem um sensível crescimento com o conteúdo, acompanhado pela rápida diminuição de D_{ev} . Nesta região a migração de água líquida começa a preponderar sobre a difusão de vapor.

No domínio de altos conteúdos, a água que se apresenta nos poros é de natureza capilar, com notável predominância de D_{el} . O coeficiente D_e cresce rapidamente com o conteúdo, apresentando um valor máximo de $1,86 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$, próximo à saturação.

CAPITULO 6

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho procurou colocar em evidência o comportamento hídrico da argamassa de cal e cimento tendo como suporte de análise a sua estrutura porosa.

Basicamente, o estudo experimental, visando caracterizar esse comportamento, foi dividido em duas partes: uma primeira relativa aos fenômenos de condensação-evaporação em estado de equilíbrio higrotérmico e na presença de vapor de água; a segunda parte está associada ao estudo da migração de umidade, em sistemas porosos isotérmicos, considerando-se aqui apenas o caso de embebição.

No que diz respeito às amostras de argamassa utilizadas, foram confeccionadas de um único preparado, quer dizer, as amostras foram confeccionadas uma só vez.

Isto é feito na tentativa de assegurar uma melhor reprodutibilidade da estrutura porosa nas diferentes amostras.

Entretanto, como foi dito na seção 1.2, com o decorrer do tempo as amostras mantidas ao ar livre sofrem a reação de carbonatação, a qual altera a composição química da pasta de ligantes, originando o carbonato de cálcio, que é mais solúvel em água que a cal: a eventual perda de matéria sólida ocasiona o aumento da porosidade.

Nas diferentes experimentações realizadas neste trabalho, há no mínimo três fatores que complicam o controle da estrutura porosa no que diz respeito à carbonatação:

- dimensões das amostras;
- tempo de experimentação;
- ambiente ao qual a amostra é submetida.

Assim, nos ensaios para a determinação da densidade aparente, porosidade e no teste de porosimetria com injeção de mercúrio, a carbonatação se apresenta apenas bem próxima à superfície externa das amostras.

As amostras utilizadas na determinação da curva $\lambda = \lambda(W)$, e nos experimentos de infiltração, apresentam uma espessura de camada carbonatada em torno de 4 mm.

Ainda que a estrutura porosa carbonatada modifique os processos de transferência de calor e transferência de umidade, o que não foi quantificado, acreditamos que dadas as grandes dimensões dessas amostras, a camada carbonatada não terá influência significativa nesses ensaios (determinação da curva $\lambda = \lambda(W)$ e experimentos de infiltração). Junte-se a isso, o fato de as amostras destinadas aos citados ensaios, não ficarem submetidas a um volume de água renovável — com exceção das duas amostras com conteúdo mássico de 17,5% usadas na obtenção da função $\lambda = \lambda(W)$ —, que seria o responsável pela perda de matéria sólida, modificando a geometria da estrutura porosa.

Nos experimentos de adsorção-dessorção, a complicação aparece devido a geometria das amostras, o tempo de ensaio, e as diferentes condições de umidade relativa a que ficam submetidas as diferentes amostras, o que ocasiona níveis de carbonatação distintos de uma para outra.

Alie-se a isso, o fato de as amostras destinadas ao ensaio de dessorção ficarem imersas em água para saturação, água esta que embora não renovável pode ocasionar uma pequena perda de matéria sólida.

Como foi mencionado, decidimos trabalhar nos ensaios de adsorção-dessorção com as amostras já carbonatadas. Este procedimento elimina alguns problemas e consideramos ainda que as propriedades físicas obtidas com este ensaio servem, em muitas vezes, como condição de contorno em problemas reais de transferência de calor e umidade em edificações, onde a argamassa já estaria carbonatada.

Podemos notar então, que há variações na estrutura porosa da argamassa quando se considera os diversos ensaios. Observamos, ainda, que freqüentemente resultados de determinados ensaios são utilizados como complementos ou elementos de comparação de outros, podendo ocorrer, dessa maneira, erros de cálculo ou de interpretação.

Neste trabalho, pôde-se notar o problema oriundo da carbonatação, entretanto, equacionar as conseqüências, ou ainda, controlar a estrutura porosa, é uma questão complexa, com a qual se deparam os pesquisadores na área, e que deve ser tema de

estudos posteriores.

De nossa parte, embora não tenhamos quantificado, acreditamos que a diferença dos resultados dos ensaios realizados neste trabalho, considerando-se estrutura porosa não carbonatada e completamente carbonatada, seja inferior às incertezas de medição associadas aos ensaios.

Com relação ao método da sonda térmica, este apresentou uma performance bastante razoável na medição da condutividade térmica aparente de materiais porosos. De fato, o método apresenta uma boa reprodutibilidade e promove pequena interferência no meio a ser medido (o intervalo de tempo requerido em cada medição é da ordem de 60s e a elevação de temperatura na sonda é da ordem de 3°C).

Para assegurar a obtenção de resultados experimentais com baixa incerteza de medição e pequena interferência no meio é importante:

- evitar a convecção do ar nos poros do meio;
- utilizar amostras de volume suficientemente grande (para retardar o efeito de borda);
- atenuar a resistência térmica de contato sonda-material;
- utilizar sonda térmica com baixa inércia térmica.

Deve ainda ser dito que o método da sonda térmica tem um baixo custo de implantação e operação.

Quanto à estrutura porosa da argamassa, pôde-se constatar que a alta concentração de microporos e mesoporos na argamassa de cal e cimento, lhe confere uma característica fortemente higroscópica, com um volume de água condensada, em presença de vapor de água, bastante significativo: a condensação capilar começa próxima da umidade relativa de 33%, crescendo abruptamente com o aumento da umidade relativa.

Nos experimentos de infiltração de água as distribuições de conteúdo de umidade obtidas com a sonda térmica, ver Fig. 5.6, parecem apresentar pontos experimentais com menor dispersão do que aqueles obtidos por Daian [3] e Merouani [4] utilizando a técnica de atenuação de raios gama.

Também, os valores obtidos experimentalmente para a difusividade isotérmica de umidade da argamassa são altos, comparáveis aos obtidos, para a argamassa de cimento, por Daian [3] e Merouani [4]. Dessa maneira, a argamassa de cal e cimento analisada neste trabalho, não apresenta uma proteção contra a umidade, característica esta, desejável para um material de revestimento de paredes.

Como sugestões para futuros trabalhos, objetivando o aprofundamento e extensão do presente estudo, citamos:

- Análise da estrutura de materiais porosos consolidados com o uso de microscopia óptica e eletrônica;
- Estudo da influência de estruturas porosas carbonatadas no que diz respeito à transferência de calor e umidade;
- Estudo teórico e experimental do fenômeno de histerese nas curvas de equilíbrio;
- Estudo da influência que a sonda térmica exerce no meio poroso, no que diz respeito à convecção de fluido - ar, água líquida ou vapor - nos poros e migração de umidade devido gradientes de temperatura;
- Construção de um modelo teórico, que a partir de uma aproximação da estrutura porosa de um dado material consolidado, do conteúdo de umidade e da temperatura, determine a condutividade térmica aparente;
- Estudo do fenômeno de histerese na migração de umidade (através da realização de experimentos envolvendo os processos de secagem e embebição em colunas de meio poroso).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VAN DER KOOI. Moisture transport in cellular concrete roofs. Ph.D. Thesis, University of Technology, Waltman Delft, 1971.
- [2] PERRIN, B. Etude des transferts couples de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil. Thèse Docteur d'Etat Université Paul Sabatier de Toulouse, Janeiro de 1985.
- [3] DAIAN, J.F. Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux. Étude expérimentale du mortier de ciment. Thèse Docteur Es-Sciences Physiques. Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembro de 1986.
- [4] MEROUANI, L. Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Étude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade. Thèse Docteur 3^e Cycle. Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembro de 1987.
- [5] CARSLAW, H.S.; JAEGER, J.C. Conduction of heat in solids. Clarendon Press, Oxford, 1959.
- [6] KASUBUCHI, T. Twin transient-state cylindrical-probe method for the determination of the thermal conductivity of soil. Soil Science, v.124, n° 5, p.255-258, 1977.
- [7] WOODSIDE, W.; MESSMER, J.H. Thermal conductivity of porous media. I. Unconsolidated sands. Journal of Applied Physics, v.32, n° 9, p.1688-1699, 1961.

- [8] FARAHT, G.M.; YAMAME, E. Efeito das dimensões geométricas de uma sonda utilizada na medição experimental da condutividade térmica de materiais isolantes térmicos. Anais do II Congresso Latino-Americano de Transferência de Calor e Matéria, p.335-347, São Paulo, maio de 1986.
- [9] BRUHAT, G. Cours de physique générale. Thermodynamique, Masson, Ed. 1968.
- [10] LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. J. Am. Chem. Soc. , v.40, p.1361-1403, 1918.
- [11] BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Amer. Chem. Soc., v.60, p.309, 1938.
- [12] BIZOT, H. Using the GAB model to construct sorption isotherms. Physical properties of foods, Appl. Science Publ., p.43-54, 1983.
- [13] DEFAY, R.; PRIGOGINE, I. Surface tension and adsorption. Longmans Green, London, 1966.
- [14] BARRET, E.P.; JOYNER, L.G.; HALENDA, P.P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. Journal of the American Chemical Society, v.73, n° 1, p.373-380.
- [15] LEDUY, A.; ZAJIC, J.E. A geometrical approach for differentiation of an experimental function at a point: applied to growth and product formation. Biotechnology and Bioengineering, v.xv, p.805-810, 1973.
- [16] BRUCE, R.R.; KLUTE, A. The measurement of soil water diffusivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., p.458-462, 1956.

- [17] QUADRI, M.B. Dinâmica de resposta de tensiômetros: desenvolvimento experimental e modelação numérica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Setembro de 1988.
- [18] REICHARDT, K. Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Universidade de São Paulo, 1965.
- [19] VACHAUD, G. Contribution à l'étude des problèmes d'écoulement en milieux poreux non saturés. These Docteur Es-Sciences Physiques, Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble, Outubro de 1968.
- [20] APPOLONI, C.R.; NARDOCCI, A.C.; OBUTI, M.M. Medidas do perfil de umidade de amostras de concreto em infiltração vertical, através da atenuação de raios-gama. Preprint - Departamento de Física - CCE/FUEL, FISUEL/P-009, 1987.
- [21] APPOLONI, C.R.; OLIVEIRA, J.C.M.; JÚNIOR, L.F.; SOUZA, A.D.B.; JÚNIOR, J.M.O. Determinação da condutividade e difusividade de solos tipo TRE e LRD através da infiltração vertical. Preprint - Departamento de Física - CCE/FUEL, FISUEL/P-010, 1987.
- [22] BLACKWELL, J.H. The axial-flow error in the thermal conductivity probe. Can. J. Phys, v.34. p.412-417, 1956.
- [23] GÜTHS, S. Um método transiente de medição de propriedades térmicas de materiais de construção. Aceito para publicação no I Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Gramado-RS., 1990.
- [24] PHILIP, J.R.; DE VRIES, D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Trans. Am. Geoph. Union, v.38, n° 2, p.222-232, 1957.

- [25] EDLEFSEN, N.E.; ANDERSON, A.B.C. The thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, v.16, p.34-299, 1943.
- [26] DE VRIES, D.A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. *Trans. Am. Geoph. Union*, v.39, n° 5, p.909-916, 1958.
- [27] HARMATHY, T.Z. Moisture sorption of building materials. National Research Council of Canada. Division of Building Research Technical Paper n° 242, 1967.
- [28] HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. Academic Press, N.Y., 1980.
- [29] LUIKOV, A.V., Heat and mass transfer in capillary-porous bodies. Pergamon Press, Ed.1966.
- [30] KAPLAN, W. Cálculo avançado. v.1. Editora Edgard Blücher Ltda. Ed.1972.
- [31] DOEBELIN, E.O. Measurement systems. Application and Design McGraw-Hill Kogakusha, LTD. Ed.1975.
- [32] SCHEIDEGGER, A.E. The physics of flow in porous media. University of Toronto Press. 1974.
- [33] FERREIRA, L.S.D. Migração de umidade causada por gradientes térmicos entre duas fronteiras impermeáveis contendo um meio poroso não-saturado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Novembro de 1987.
- [34] CHILD, E.C., COLLIS GEORGE, N. The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc. London* 201 A, 1950.
- [35] MUALEM, Y. New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v.12, n° 3, p.513-522.

- [36] DE VRIES, D.A. The thermal conductivity of granular materials. Annexe 1952 I. Bull. Inst. Intern. du Froid, p.115-131, 1952.
- [37] DE VRIES, D.A. Thermal properties of soils. In W. R. Van Wijk Ed. North Holland, Amsterdam, 2nd ed., p.210-235, 1963.
- [38] LACHENBRUCH, A.H. A probe for measurement of thermal conductivity of frozen soils in place. Trans. Am. Geoph. Union, v.39, n° 5, p.691-697, 1957.
- [39] JACKSON, R.D. Water vapor diffusion in relatively dry soil: IV. temperature and pressure effects on sorption diffusion coefficients. Soil Science Soc. Proc., p.144-148, 1965.
- [40] NIELSON, D.R.; BIGGAR, J.W.; DAVIDSON, J.M. Experimental consideration of diffusion analysis in unsaturated flow problems. Soil Sc. Soc. of Am. Proc., v.26, n° 2, p.107-111, 1962.
- [41] SOUZA, H.A. Transporte simultâneo de calor e umidade em meios porosos: método das funções de transferência. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, maio de 1985.
- [42] SCHNEIDER, P.S. Comunicações interpessoais.
- [43] ONTARIO HYDRO RESEARCH LABORATORY. Soil thermal resistivity and thermal stability measuring instrument. Epri E1 - 2128 v.1, novembro 1981.

APENDICES

APÊNDICE A

UMIDADE RELATIVA MANTIDA PELAS SOLUÇÕES SALINAS SATURADAS A 25° C

NORMA FRANCESA NF X 15 - 014 — RETIRADO DA REFERÊNCIA [4]

SOLUÇÃO SALINA	UMIDADE RELATIVA (%)
HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO KOH	8
ACETATO DE POTÁSSIO $\text{K CH}_3\text{CO}_2$	22
CLORETO DE MAGNÉSIO $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33
CARBONATO DE POTÁSSIO $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	42
BICROMATO DE SÓDIO $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
NITRITO DE SÓDIO NaNO_2	
CLORETO DE SÓDIO NaCl	76
SULFATO DE AMÔNIO $\left(\text{NH}_4\right)_2\text{SO}_4$	80
SULFATO DE POTÁSSIO K_2SO_4	97

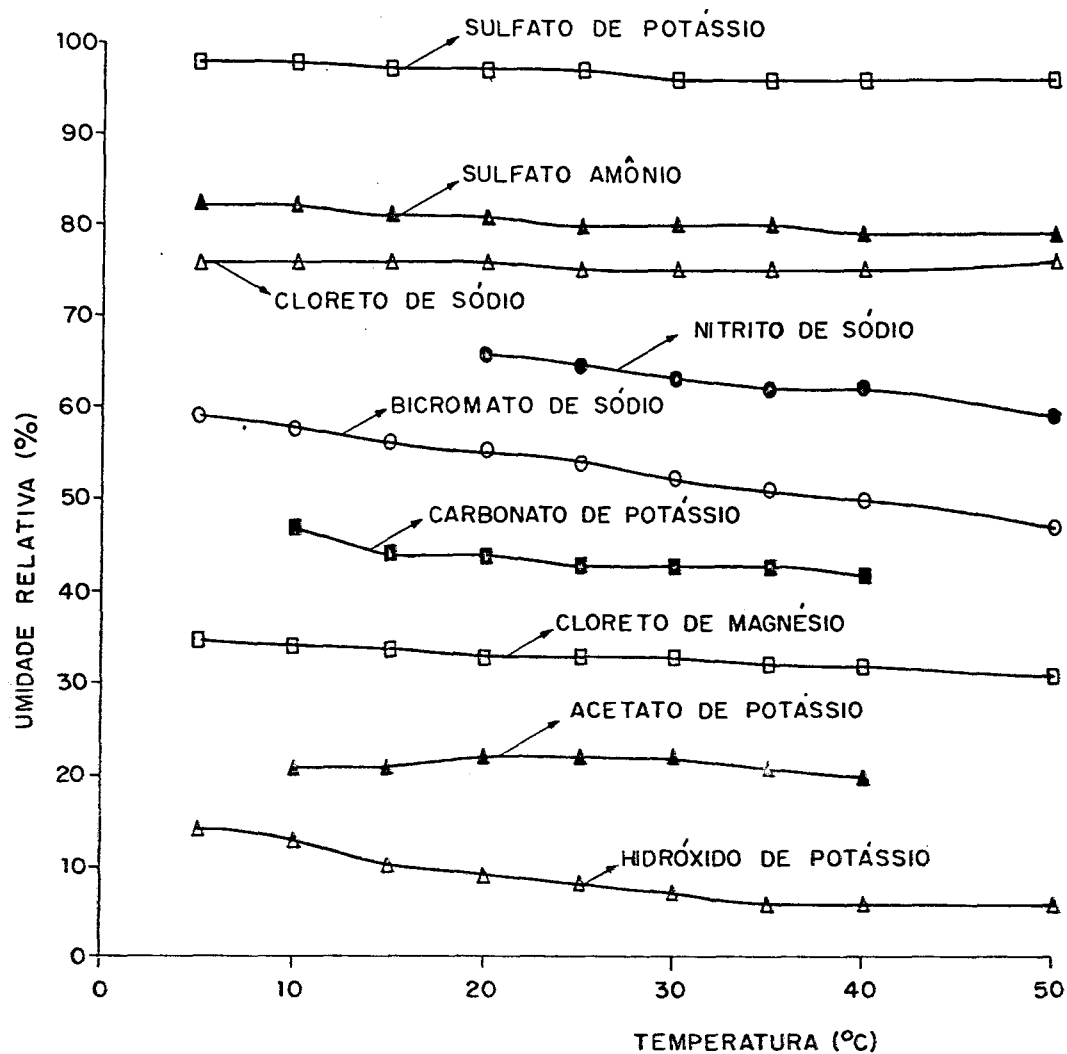


Fig.A.1 - Variação da umidade relativa mantida pelas soluções salinas com a temperatura.

APÊNDICE B

MÉTODO DA DIFERENCIAÇÃO GEOMÉTRICA

Considere-se três pontos do plano cartesiano xy : $A \left[x_A, y_A \right]$; $B \left[x_B, y_B \right]$ e $C \left[x_C, y_C \right]$.

Seja $y = y(x)$ o arco de circunferência passando pelos pontos citados, ver Fig.B.1.a.

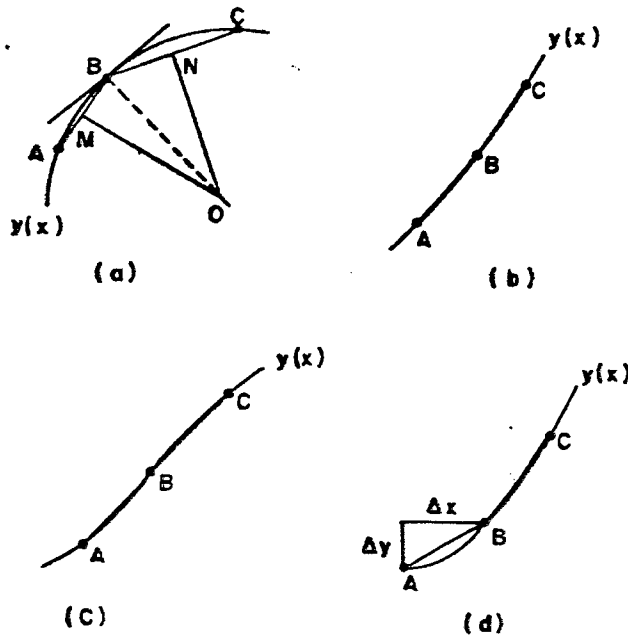


Fig.B.1 -Ilustração para o método da diferenciação geométrica no ponto B no caso geral (a), quando B está sobre uma linha reta (b), quando B é um ponto de inflexão (c), no ponto de partida A (d).

Nessas condições:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_B} = \text{declividade da tangente ao arco no ponto B} \quad (B.1)$$

As equações para as linhas retas AB e BC são:

$$AB : y = m_{AB} x + n_{AB} \quad (B.2)$$

onde a declividade m_{AB} e intercepto n_{AB} são dados por:

$$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} ; \quad n_{AB} = \frac{y_A x_B - y_B x_A}{x_B - x_A}$$

$$BC : y = m_{BC} x + n_{BC} \quad (B.3)$$

Com a declividade m_{BC} e o intercepto n_{BC} dados por:

$$m_{BC} = \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} ; \quad n_{BC} = \frac{y_B x_C - y_C x_B}{x_C - x_B}$$

Tomando $M(x_M, y_M)$ e $N(x_N, y_N)$ como os pontos médios de AB e BC respectivamente, as linhas retas MO e NO representam as respectivas perpendiculares a AB e BC em seus pontos médios. As equações para MO e NO são:

$$MO: y = m_{MO} x + n_{MO} \quad (B.4)$$

onde:

$$m_{MO} = -\frac{1}{m_{AB}} = \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A} ,$$

$$n_{MO} = y_M - m_{MO} x_M = \frac{|y_A + y_B|}{2} - m_{MO} \frac{|x_A + x_B|}{2}$$

Equação para NO:

$$y = m_{NO} x + n_{NO} \quad (B.5)$$

onde:

$$m_{NO} = -\frac{1}{m_{BC}} = \frac{x_B - x_C}{y_C - y_B} ,$$

$$n_{NO} = y_N - m_{NO} x_N = \frac{y_B + y_C}{2} - m_{NO} \frac{x_B + x_C}{2}$$

As coordenadas do ponto de intersecção $O(x_o, y_o)$, das linhas NO e MO, são determinadas através de suas equações, resultando:

$$x_o = \frac{n_{NO} - n_{MO}}{m_{MO} - m_{NO}},$$

$$y_o = m_{MO} x_o + n_{MO} = m_{NO} x_o + n_{NO}$$

A equação da linha reta OB é:

$$y = m_{OB} x + n_{OB} \quad (B.6)$$

onde:

$$m_{OB} = \frac{y_B - y_o}{x_B - x_o}$$

Finalmente, determina-se a declividade da reta tangente ao arco $y(x)$ no ponto B:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_B} = - \frac{1}{m_{OB}} = \frac{x_o - x_B}{y_B - y_o}$$

Os casos particulares a serem considerados são os seguintes:

a) Se as declividades de AB e BC são aproximadamente iguais, Fig.B.1.b, a aproximação é:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_B} = \frac{m_{AB} + m_{BC}}{2};$$

b) Se B é um ponto de inflexão, Fig.B.1.c, a aproximação

anterior também pode ser usada;

- c) Para o caso de um ponto de partida ou ponto final, Fig.B.1.d, a derivada pode ser aproximada por:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_A} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Este método, criado por Leduy e Zajic [15], foi retirado da referência [17].

APÊNDICE C

EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA COM O TEMPO NA SONDA TÉRMICA

Consideremos novamente o sistema mostrado na Fig.4.3, onde se adotou as seguintes hipóteses e simbologia:

- SIMBOLOGIA

- r = distância relativa ao eixo da sonda, z e z' ;
- r_1 = raio da sonda;
- r_2 = raio do furo na argamassa;
- $T_s(t)$ = temperatura uniforme da sonda em função do tempo;
- $T_1(t)$ = temperatura no meio 1 (mercúrio);
- $T_2(t)$ = temperatura no meio 2 (argamassa);
- λ_1, a_1 = condutividade e difusividade térmica do meio 1;
- λ_2, a_2 = condutividade e difusividade térmica do meio 2;
- Q = potência emitida por unidade de comprimento da sonda;
- M_o = massa da sonda por unidade de comprimento;
- C_o = calor específico da sonda;
- H = coeficiente de troca de calor superficial entre os meios 1 e 2;
- $\gamma = 0,5772$, a constante de Euler.

- HIPÓTESES ADOTADAS

- Taxa de dissipação de calor constante e uniforme na sonda;
- Temperatura da sonda uniforme;
- Fluxo de calor radial e apenas por condução;
- Para $t = 0$, todo o sistema está a mesma temperatura;
- Meio infinito.

As equações para a propagação de calor em coordenadas cilíndricas, para o sistemas da Fig.4.3, são:

$$\text{meio 1: } \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} ;$$

$$\text{meio 2: } \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} .$$

Sujeitas às seguintes condições de contorno e à condição inicial:

Condições de Contorno:

$$\text{meio 1: } r = r_1 , \quad -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \bigg|_{r=r_1} = \frac{Q}{2\pi r_1} - \frac{M_o C_o}{2\pi r_1} \frac{\partial T_o}{\partial t}$$

$$r = r_2 , \quad -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \bigg|_{r=r_2} = H (T_1 - T_2)$$

$$\text{meio 2: } r = r_2 , \quad -\lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \bigg|_{r=r_2} = H (T_1 - T_2)$$

$$r \rightarrow \infty , \quad T_2 \rightarrow 0 ;$$

Condição Inicial:

$$\text{Para } t = 0 , \quad T_o = T_1 = T_2 = 0$$

Deseja-se encontrar a evolução de temperatura com o tempo na sonda, $T_o(t)$, que é equivalente a obter a expressão para $T_1(r_1, t)$. Para tanto, utiliza-se a transformação de Laplace, cujo interesse reside na eliminação da variável tempo.

Efetua-se as mudanças de variáveis:

$$u = q_1 r , \quad q_1 = \left(\frac{p}{a_1} \right)^{\frac{1}{2}} ;$$

$$v = q_2 r \quad , \quad q_2 = \left(\frac{p}{a_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad , \quad \text{onde:}$$

p = parâmetro de Laplace.

Assim, se \bar{T}_s , \bar{T}_1 e \bar{T}_2 representam as transformadas de Laplace de T_s , T_1 e T_2 , respectivamente, o sistema de equações que descreve a propagação de calor, e as suas condições de contorno, se tornam:

$$\frac{d^2 \bar{T}_1}{du^2} + \frac{1}{u} \frac{d\bar{T}_1}{du} = \bar{T}_1 \quad (C.1)$$

$$\frac{d^2 \bar{T}_2}{dv^2} + \frac{1}{v} \frac{d\bar{T}_2}{dv} = \bar{T}_2 \quad (C.2)$$

$$-\lambda_1 q_1 \left(\frac{d\bar{T}_1}{du} \right) \Big|_{r=r_1} = \frac{Q}{2\pi r_1 p} - \frac{M_o C_o p}{2\pi r_1} \bar{T}_s \quad (C.3)$$

$$-\lambda_1 q_1 \left(\frac{d\bar{T}_1}{du} \right) \Big|_{r=r_2} = H \left(\bar{T}_1 r_2 - \bar{T}_2 r_2 \right) \quad (C.4)$$

$$-\lambda_2 q_2 \left(\frac{d\bar{T}_2}{dv} \right) \Big|_{r=r_2} = H \left(\bar{T}_1 r_2 - \bar{T}_2 r_2 \right) \quad (C.5)$$

$$r \rightarrow \infty \quad , \quad \bar{T}_2 \rightarrow 0 \quad (C.6)$$

As equações C.1 e C.2 são as equações de Bessel modificadas, as quais admitem soluções da forma:

$$\bar{T}_1(u) = A I_0^1(u) + B K_0^1(u)$$

$$\bar{T}_2(v) = C I_0^2(v) + D K_0^2(v) \quad , \quad \text{onde:}$$

I_0 e K_0 são as funções de Bessel modificadas de ordem 0.

As equações relativas às condições de contorno, se escrevem agora:

$$\begin{aligned} -\lambda_1 q_1 \left[A I_1^1(r_1) - B K_1^1(r_1) \right] &= \frac{Q}{2\pi r_1 p} - \\ - \frac{M_0 C_0 p}{2\pi r_1} T_s & \end{aligned} \quad (C.7)$$

$$-\lambda_1 q_1 \left[A I_1^1(r_2) - B K_1^1(r_2) \right] = H \left(\bar{T}_1 r_2 - \bar{T}_2 r_2 \right) \quad (C.8)$$

$$-\lambda_2 q_2 \left[C I_1^2(r_2) - D K_1^2(r_2) \right] = H \left(\bar{T}_1 r_2 - \bar{T}_2 r_2 \right) \quad (C.9)$$

$$C = 0 \quad (C.10)$$

Onde, I_1 e K_1 representam as funções de Bessel modificadas de ordem 1.

O sistema constituído pelas equações C.7, C.8, C.9 e C.10 contém quatro incógnitas: A, B, C e D. A resolução desse sistema permite conhecer A e B e portanto $\bar{T}_1 r_1$.

Escreve-se:

$$\bar{T}_1 r_1 = \frac{Q}{2\pi r_1 p} \times$$

$$\times \frac{Y I_0^1(r_1) + X K_0^1(r_1)}{\lambda_1 q_1 \left[X K_1^1(r_1) - Y I_1^1(r_1) \right] + \frac{M_0 C_0 p}{2\pi r_1} \left[Y I_0^1(r_1) + X K_0^1(r_1) \right]} \quad (C.11)$$

onde:

$$X = - \left\{ \lambda_2 q_2 K_1^2(r_2) \left[H I_0^1(r_2) + \lambda_1 q_2 I_1^1(r_2) \right] + \right.$$

$$\left. + H \lambda_1 q_1 I_1^1(r_2) K_0^2(r_2) \right\}$$

$$Y = \lambda_2 q_2 K_1^2(r_2) \left[H K_0^1(r_2) - \lambda_1 q_1 K_1^1(r_2) \right] -$$

$$- H \lambda_1 q_1 K_1^1(r_2) K_0^2(r_2)$$

Com o interesse nos grandes valores de tempo, pode-se considerar as funções de Bessel em seus desenvolvimentos normais e também, que o parâmetro de Laplace p é pequeno.

Escrevendo-se os desenvolvimentos normais das funções de Bessel:

$$I_0 = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{2r}}{r! r!}$$

$$I_i = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{i+2r}}{r! \Gamma(i+r+1)}$$

$$K_0 = - \left[\ln(z/2) + \gamma \right] I_0(z) + (z/2)^2 + \left(1 + \frac{1}{2} \right) \frac{(z/2)^4}{(2!)^2} +$$

$$+ \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) \frac{(z/2)^6}{(3!)^2} + \dots$$

$$K_n = (-1)^{n+1} \left[\ln(z/2) + \gamma \right] I_n(z) + \frac{1}{2} (-1)^n \times$$

$$\times \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{n+2r}}{r!(n+r)!} \left[\sum_{m=1}^{n+r} m^{-1} + \sum_{m=1}^r m^{-1} \right] +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{r=0}^{n-1} (-1)^r (z/2)^{-n+2r} \frac{(n-r-1)!}{r!}$$

Esses desenvolvimentos aplicados a I_0 , I_1 , K_0 e K_1 conduzem à:

$$I_0 = 1 + (z/2)^2 + \frac{1}{4} (z/2)^4 + \frac{1}{36} (z/2)^6 + \dots$$

$$I_1 = z/2 + \frac{1}{2} (z/2)^3 + \frac{1}{12} (z/2)^5 + \frac{1}{144} (z/2)^7 + \dots$$

$$K_0 = -\ln(z/2) \left[1 + (z/2)^2 + \frac{1}{4} (z/2)^4 + \frac{1}{36} (z/2)^6 \right] -$$

$$- \gamma + (1 - \gamma) (z/2)^2 + \left(\frac{z - 2\gamma}{8} \right) \left(\frac{z}{2} \right)^4 + \left(\frac{11 - 6\gamma}{216} \right)$$

$$\left(\frac{z}{2} \right)^6 + \dots$$

$$K_1 = \ln(z/2) \left[z/2 + \frac{1}{2} (z/2)^3 + \frac{1}{12} (z/2)^5 + \right.$$

$$+ \frac{1}{144} (z/2)^7 \Big] + \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{1}{4} \right) z/2 + \left(\frac{\gamma}{2} - \frac{5}{8} \right) \left(\frac{z}{2} \right)^3 +$$

$$+ \left(\frac{\gamma}{12} - \frac{5}{36} \right) (z/2)^5 + \left(\frac{\gamma}{144} - \frac{47}{3456} \right) (z/2)^7 + \frac{1}{z}$$

Podemos escrever as quatro funções I_0 , I_1 , K_0 e K_1 na forma geral:

$$I_0 = 1 + \sum_i a_i z^i$$

$$I_1 = \sum_i b_i z^i$$

$$K_0 = -\ln z \left(1 + \sum_i c_i z^i \right) + c^{(0)} + \sum_i d_i z^i$$

$$K_1 = \ln z \left(\sum_i e_i z^i \right) + \sum_i f_i z^i + \frac{1}{z}$$

Quando p ou z tendem a zero, as funções I_0 e I_1 tendem para 1 e 0, respectivamente, enquanto que K_0 e K_1 tendem ao infinito.

Retomando a expressão do denominador da equação para \bar{T}_1 , Eq.C.11, escrevemo-la na forma:

$$DN = Gp q_1 \left[XK_1 + y I_1 \right] + Hp^2 \left[y I_0 + XK_0 \right]$$

onde:

$$X = Aq K_1 I_0 + Bq^2 K_1 I_1 + Cq I_1 K_0$$

$$Y = Dq K_1 K_0 + Eq^2 K_1 K_1 + Fq K_1 K_0$$

Reescrevemos o denominador DN na forma:

$$\begin{aligned}
 DN = & Gp \, q^2 \, A \, K_1 \, K_1 \, I_0 + GBp \, q^3 \, K_1 \, K_1 \, I_1 + GCp \, q^2 \, I_1 \, K_0 \, K_1 + \\
 & + GDp \, q^2 \, K_1 \, K_0 \, I_1 + GEp \, q^2 \, K_1 \, K_1 \, I_1 + GFp \, q^2 \, K_1 \, K_0 \, I_1 + \\
 & + HD \, p^2 q \, K_1 \, K_0 \, I_0 + EH \, p^2 \, q^2 \, K_1 \, K_1 \, I_0 + HF \, p^2 q \, K_1 \, K_0 \, I_0 + \\
 & + HA \, p^2 q \, K_1 \, I_0 \, K_0 + H \, p^2 \, q^2 \, K_1 \, I_1 \, K_0 + HC \, p^2 q \, I_1 \, K_0 \, K_0
 \end{aligned}$$

Se nós procuramos o comportamento do denominador DN, quando z tende a zero, nós devemos considerar o comportamento dos seguintes termos:

$$z^4 \, K_1 \, K_1 \, I_0; \quad z^4 \, K_1 \, K_1 \, I_1; \quad z^4 \, K_0 \, K_1 \, I_1; \quad z^5 \, K_1 \, K_0 \, I_0;$$

$$z^5 \, K_0 \, K_0 \, I_1$$

Escrevendo as expressões para esses termos:

$$\begin{aligned}
 z^4 \, K_1 \, K_1 \, I_0 = & z^4 \left[\ln z \left(\sum_i e_i \, z^i \right) + \sum_i f_i \, z^i + \frac{1}{z} \right]^2 \times \\
 & \times \left(1 + \sum_i q_i \, z^i \right),
 \end{aligned}$$

que é da forma:

$$\sum_j A_j \ln z \left(z^j \right) + \sum_j B_j \, z^j, \quad j \geq 2;$$

$$\begin{aligned}
 z^4 \, K_1 \, K_1 \, I_1 = & z^4 \left[\ln z \left(\sum_i e^i \, z^i \right) + \sum_i f_i \, z^i + \frac{1}{z} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 & \left(\sum_i b_i \, z^i \right),
 \end{aligned}$$

que é da forma:

$$\sum_j A_j \ln z \left(z^j \right) + \sum_j B_j \, z^j, \quad j \geq 2;$$

$$z^4 K_0 K_1 I_1 = z^4 \left[-\ln z \left(1 + \sum_i C_i z^i \right) + C^{te} + \sum_i d_i z^i \right] \\ \left[\sum_i b_i z^i \right] \left[\ln z \left(\sum_i e_i z^i \right) + \sum_i f_i z^i + \frac{1}{z} \right]$$

que é da forma:

$$\sum_j A_j (\ln z)^2 z^j + \sum_j B_j z^j + \sum_j C_j \ln z z^j, \quad j \geq 2;$$

$$z^5 K_1 K_0 I_0 = z^5 \left[\ln z \left(\sum_i e^i z^i \right) + \sum_i f_i z^i + \frac{1}{z} \right] \times \\ \times \left[1 + \sum_i a_i z^i \right] \left[-\ln z \left(1 + \sum_i C_i z^i \right) + C^{te} + \sum_i d_i z^i \right],$$

que é da forma:

$$\sum_j A_j (\ln z)^2 z^j + \sum_j B_j z^j + \sum_j C_j \ln z z^j, \quad j \geq 2;$$

$$z^5 K_0 K_0 I_1 = z^5 \left[-\ln z \left(1 + \sum_i C_i z^i \right) + C^{te} + \sum_i d_i z^i \right]^2 \\ \times \left[\sum_i b_i z^i \right],$$

que é da forma:

$$\sum_j A_j \ln z z^j + \sum_j B_j z^j, \quad j \geq 2$$

Todos esses termos, tendem a zero, quando z ou p tendem a zero.

Limitando os desenvolvimentos das funções de Bessel, como abaixo:

$$I_0 = 1 + (z/2)^2$$

$$I_1 = z/2$$

$$K_0 = -\ln z/2 \left[1 + (z/2)^2 \right] - \gamma + (1 - \gamma) (z/2)^2$$

$$K_1 = \ln z/2 (z/2) + (\gamma/2 - 1/4) z/2 + 1/z,$$

O denominador da expressão de \bar{T}_1 se escreve:

$$\begin{aligned} DN = & \frac{H\lambda_1 \lambda_2 q_1^2 r_1}{2r_2} - \frac{H\lambda_1 \lambda_2 q_2^2 r_2}{2r_1} \ln U + \frac{H\lambda_1 \lambda_2 q_2^2 r_2}{4r_1} - \frac{H\lambda_1 \lambda_2}{r_1 r_2} - \\ & - \frac{H\lambda_1 \lambda_2 q_1^2 r_2}{4r_1} - \frac{\lambda_1^2 \lambda_2 q_1^2}{2r_1} + \frac{H\lambda_1^2 q_1^2 r_2 \ln U}{2r_1} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2 q_1^2 r_1}{2r_2^2} - \\ & - \frac{H\lambda_1^2 q_1^2 r_1}{2r_2} \ln U - \frac{M_o C_o}{2\pi r_1} \left(\frac{p\lambda_1 \lambda_2}{r_2^2} - \frac{pH\lambda_1 \ln U}{r_2} \right) \end{aligned}$$

ou ainda:

$$\begin{aligned} DN = & \frac{H\lambda_1 \lambda_2}{r_1 r_2} \left[\frac{q_1^2 r_1^2}{4} - \frac{q_2^2 r_2^2}{2} \ln U + \frac{q_2^2 r_2^2}{4} - \frac{q_1^2 r_2^2}{4} - \right. \\ & - \frac{\lambda_1 q_1^2 r_2}{2H} + \frac{\lambda_1 q_1^2 r_2^2}{2\lambda_2} \ln U + \frac{\lambda_1 q_1^2 r_1^2}{2r_2 H} - \frac{\lambda_1 q_1^2 r_1}{2\lambda_2} \ln U - \\ & \left. - \frac{M_o C_o}{2\pi} \left(\frac{p}{r_2 H} - \frac{p}{\lambda_2} \ln U \right)^{-1} \right] \end{aligned}$$

Todos os termos da soma entre colchetes da expressão anterior para DN são muito pequenos e podem ser escritos na forma $(\varepsilon - 1)$.

Fazendo aparecer na equação de \bar{T}_1 uma expressão da forma $\frac{M}{\varepsilon-1}$, e considerando ε^2 pequeno, escrevemos:

$$\frac{M}{\varepsilon-1} \cong -M(1 + \varepsilon)$$

Agora, \bar{T}_1 se escreve:

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} & \left\{ \left[\frac{r_2^2 - r_1^2}{2a_1} + \frac{r_2\lambda_1}{2Ha_1} - \frac{\lambda_1 r_1^2}{r_2 Ha_1} + \frac{M_0 C_0}{\pi r_2 H} \right] \ln U - \right. \\ & - \frac{1}{P} \ln U + \frac{\lambda_2}{r_2 H} \frac{1}{P} + \left[\frac{\lambda_1 r_1^2}{2a_1 \lambda_2} - \frac{M_0 C_0}{2\pi\lambda_2} - \frac{\lambda_1 r_2^2}{2\lambda_2 a_1} \right] (\ln U)^2 - \\ & \left. - \frac{r_2^2}{2a_1} \ln U \ln z'' + \frac{r_2^2}{2a_1} \ln U \ln z' - \frac{\lambda_2 r_2^2}{2Ha_1} \ln z' \right\} \end{aligned}$$

$$\text{com: } \ln U = \gamma + \ln \frac{q_2 r_2}{2}$$

$$\ln z' = \gamma + \ln \frac{q_1 r_1}{2}$$

$$\ln z'' = \gamma + \ln \frac{q_1 r_2}{2}$$

A temperatura $\bar{T}_1(r_1, t)$ é obtida pela transformação membro a membro dos termos de $\bar{T}_1 r_1$, daí:

$$\begin{aligned} T_e(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda_2} & \left\{ \left[\ln \frac{4a_2 t}{r_2^2} - \gamma + \frac{2\lambda_2}{r_2 H} \right] - \frac{1}{t} \left[\frac{r_2^2 - r_1^2}{a_1} + \right. \right. \\ & + \lambda_1 \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2 Ha_1} + \frac{2M_o C_o}{\pi r_2 H} - \frac{\lambda_2 r_2}{Ha_1} - \frac{r_2^2}{4a_1} \ln \frac{r_2^2}{r_1^2} \left. \right] + \\ & + \frac{1}{t} \left[\ln \frac{4a_2 t}{r_2^2} - \gamma \right] \times \left[\lambda_1 \frac{r_1^2 - r_2^2}{2\lambda_2 a_1} - \frac{M_o C_o}{2\pi\lambda_2} \right] \left. \right\} \end{aligned}$$

Esta solução é aproximada e supõe que $t \gg \frac{r_2^2}{a_2}$ e $t \gg \frac{r_2^2}{a_1}$. Considerando que $a_1 \gg a_2$, essa condição de validade reduz a $t \gg \frac{r_2^2}{a_2}$.

Esta análise foi transcrita das páginas 39-48 da referência [2].

APÊNDICE D

TRANSFORMAÇÃO DE BOLTZMANN

Considere-se o problema do fluxo de água horizontal insaturado em colunas de material poroso de secção transversal constante e comprimento semi-infinito, como foi visto na secção 5.2.2.

A equação da conservação da massa para o caso unidimensional, Eq. 5.16, é:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\theta}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (D.1)$$

sujeita às condições:

$$\theta = \theta_i \quad \text{para } x > 0 \quad \text{e} \quad t = 0, \quad (D.2)$$

$$\theta = \theta_f \quad \text{para } x = 0 \quad \text{e} \quad t > 0 \quad (D.3)$$

onde:

$$\theta = \theta(x, t) \quad \text{e} \quad D_{\theta} = D_{\theta}(\theta).$$

Uma solução pelo método de separação de variáveis pode ser obtida se x for feita a variável dependente, ou seja, $x = x(\theta, t)$.

Procedendo a transformação de $\theta(x, t)$ para $x(\theta, t)$ e fazendo uso das regras de cadeia, vêm:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\frac{\partial x}{\partial t}}{\frac{\partial x}{\partial \theta}} \quad (D.4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{1}{\frac{\partial x}{\partial \theta}} \quad (D.5)$$

A Eq. D.1 toma agora a seguinte forma:

$$-\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D_{\theta}}{\frac{\partial x}{\partial \theta}} \right)$$

O problema pode, então, ser referido a Eq.D.6 ^{sujeito} às condições D.2 e D.3, com x considerado dependente de θ e t.

Assume-se agora que a solução da Eq.D.6 possa ser escrita na forma de um produto:

$$x = \varphi(\theta) \delta(t) \quad (D.7)$$

onde φ é função apenas de θ e δ é função apenas de t.

Da Eq.D.7 têm-se:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \varphi(\theta) \frac{d\delta(t)}{dt} ;$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta} = \delta(t) \frac{d\varphi(\theta)}{d\theta} ;$$

Substituindo as expressões anteriores na Eq.D.6 e rearranjando os termos vem:

$$\delta \frac{d\delta}{dt} = - \frac{1}{\varphi} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{D_{\theta}(\theta)}{d\varphi/d\theta} \right) \quad (D.8)$$

Como o lado esquerdo da Eq.D.8 depende apenas de t e o lado direito apenas de θ , cada lado deve ser igual a uma constante, que será chamada de "a".

Fazendo isto e rearranjando os termos, obtém-se duas equações diferenciais ordinárias:

$$\delta d\delta = a dt \quad (D.9)$$

$$\frac{d}{d\theta} \left(D_{\theta}(\theta) \frac{d\theta}{d\varphi} \right) = - a\varphi \quad (D.10)$$

Integrando-se a Eq.D.9 e resolvendo para δ , tem-se:

$$\delta = \left[2a \left(t + c_1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (D.11),$$

onde c_1 é uma constante de integração.

Combinando a Eq.D.11 com a Eq.D.7, obtém-se:

$$x = \eta(\theta) \cdot \left(t + c_1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (D.12),$$

onde $\eta = \varphi(2a)^{\frac{1}{2}} = \eta(\theta)$, visto que φ depende unicamente de θ .

Portanto, $d\eta = (2a)^{\frac{1}{2}} d\varphi$, e a Eq.D.10 toma a forma:

$$\frac{d}{d\theta} \left[D_\theta(\theta) \frac{d\theta}{d\eta} \right] = - \frac{\eta}{2} \quad (D.13)$$

Como a Eq.D.12 deve ser uma solução para o problema, as condições de contorno devem satisfazê-la. A condição D.3 na Eq.D.12 fornece:

$$\eta \left(\theta_f \right) = 0 \quad (D.14)$$

A condição D.2 na Eq.D.12 produz:

$$\eta \left(\theta_i \right) = \frac{x}{c_1^{\frac{1}{2}}} \quad (D.15)$$

Se c_1 for finito e diferente de zero, θ_i irá variar com x , em violação a condição D.2. Infinito e zero são as únicas escolhas para c_1 , as quais fazem $\eta(\theta_i)$, e, portanto θ_i , constante e independente de x finito e diferente de zero.

Entretanto, se $c_1 \rightarrow \infty$, tem-se $\eta(\theta_i) = 0$; dessa maneira, com a Eq.D.14, chega-se ao caso estático trivial onde $\theta_i = \theta_f$.

Portanto, para uma solução não trivial, faz-se $c_1 = 0$, ou:

$$\eta \left(e_i \right) \rightarrow \infty \quad (D.16)$$

O problema da Eq.D.6 sujeito às condições D.2 e D.3 é assim reduzido a Eq.D.13 sujeito às condições D.14 e D.15. O uso de $c_1 = 0$ na Eq.D.12 leva a expressão:

$$\eta(\theta) = x \cdot t^{-\frac{1}{2}} \quad (D.17)$$

que é conhecida como transformação de Boltzmann, já utilizada na seção 5.2.2.

Esta análise foi transcrita do apêndice A, páginas 160 a 163, da referência [17].